

Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken mit Kunstharzpressholz (KP)

D 386

**Vom Fachbereich Architektur
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation**

**von
Dennis Franz Albert Röver**

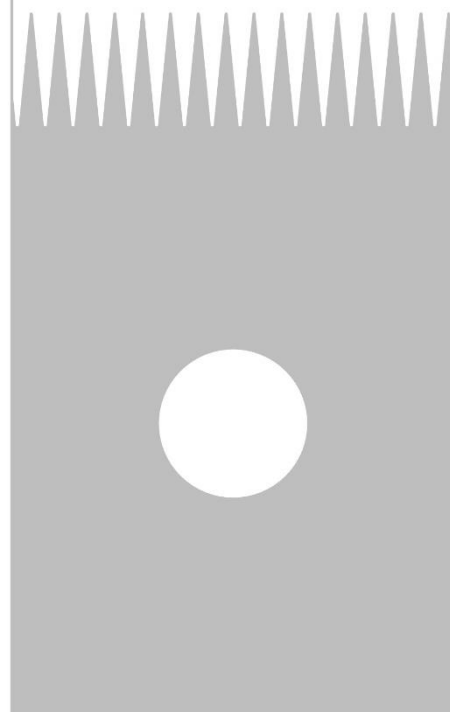
Datum der Disputation: 11.03.2020

Dekan: Prof. Dipl.-Ing. Dirk Bayer

**Vorsitzender der
Promotionskommission: Prof. Dipl.-Ing. Helmut Kleine-Kraneburg**

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
Fachgebiet Tragwerk und Material
Technische Universität Kaiserslautern

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Institut für Tragwerksentwurf
Technische Universität Braunschweig



Meinem kleinen Sohn, meiner lieben Anita

Vorwort und Dank

Die nachfolgende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerk und Material am Fachbereich Architektur der Technischen Universität Kaiserslautern entstanden. Innerhalb der Arbeit werden unter anderem Erkenntnisse aus den nachfolgend aufgeführten Forschungsprojekten und des nachfolgend aufgeführten Bauprojektes aufgegriffen, an denen ich mitgewirkt habe:

Forschungsprojekte

Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken

(Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Förderkennzeichen KF3423101AT4)

Entwicklung neuartiger Holz-Beton-Verbundbrücken aus Laub-Brettschichtholz und Faserbeton

(Bundesministerium für Wirtschaft und Energie - Förderkennzeichen KF2268004AT4)

Neue Potentiale im konstruktiven Holzbau durch acetylierte Buche

(Bundesministerium für Bau-, Stadt- und Raumforschung - Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.13)

Bauprojekt

T-Lab Diemerstein – Campus für innovativen Holzbau im Pfälzer Wald

(Technische Universität Kaiserslautern)

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf möchte ich für die Betreuung meiner Arbeit und die aufschlussreiche Kritik meinen Dank aussprechen.

Besonderen Dank schulde ich meiner Partnerin Anita, deren Geduld, familiärer Rückhalt und stete Motivation maßgeblichen Anteil am Gelingen dieser Arbeit hat.

Kurzfassung

Mit dem Einsatz stiftförmiger Verbindungsmittel am Stabende werden Holzstäbe durch die notwendigen Bohrlöcher für die Verbindungsmittel und durch die notwendigen Schlitz für die Verbindungsbleche stets geometrisch und damit statisch geschwächt. Das volle Tragpotential des Einzelstabes kann somit - mit konventionellen Verbindungsmitteln, wie Stabdübeln, (Pass)-Bolzen aber auch Dübeln besonderer Bauart – nicht vollständig ausgeschöpft werden. Der Wirkungsgrad von Bauteilanschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln wird nach Ehlbeck & Werner (1994, S. 1.1) mit 40 % - 60 % quantifiziert. Eine Optimierung der Anschlussbereiche macht folglich Sinn, da im Idealfall die Tragfähigkeit - sowohl des Einzelstabes als auch der gesamten Tragstruktur - verdoppelt werden kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verstärkung von Bauteilanschlüssen in auf Normalkraft beanspruchten Stabtragwerken mit Kunstharzpressholz (KP) untersucht, das mittels einer Keilzinkenverbindung an die Enden nativer Stäbe geklebt wird. Es werden sowohl charakteristische Keilzinkenfestigkeiten unterschiedlicher Profilgeometrien an hybriden Verbindungen zwischen nativem Holz und KP ermittelt als auch Lochleibungsfestigkeiten von KP unterschiedlichen Aufbaus an zylindrischen Verbindungsmitteln mit einem Durchmesser von $d = 8 \text{ mm}$ bis $d = 60 \text{ mm}$ bestimmt. Die Untersuchungen belegen, dass die Tragfähigkeit des Anschlussbereiches sowie die Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung zwischen nativem Holz und KP größer ist als die Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts eines nativen Stabes bis Festigkeitsklasse C35. Deshalb kann die volle Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts für den statischen Nachweis angesetzt und damit eine Bemessung auf den Spannungsnachweis bei Zugstäben und auf den Stabilitätsnachweis bei Druckstäben vereinfacht werden. Gleichzeitig ist eine Reduktion der für die Verbindung notwendigen zylindrischen Verbindungsmittel auf ein einziges möglich, was die Bauteilmontage erheblich vereinfacht.

Aufgrund seiner hohen Festigkeit, Härte und Formstabilität eignet sich KP bestens um reversible Bauteilanschlüsse auszubilden. Um die Verbindung zerstörungsfrei zu lösen und um die Wiederverwendbarkeit der Bauteile zu ermöglichen, müssen plastisch irreversible Verformungen der Verbindungsmittel als auch der Lochleibung ausgeschlossen werden. Innerhalb dieser Arbeit wird neben den eigentlichen Lochleibungsfestigkeiten daher auch der Einfluss der Verbindungsmittelschlankheit auf das Tragverhalten von Anschlüssen mit zylindrischen Verbindungsmitteln in KP untersucht.

Neben Scher-Lochleibungsanschlüssen werden auch Anschlüsse mit vorgespannten Schrauben im KP-verstärkten Stabende thematisiert. Im Vergleich zu reinen Scher-Lochleibungsverbindungen kann mit gleitfesten Verbindungen die Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses signifikant gesteigert werden. Zudem lassen sich unter Einhaltung üblicher Bauteiltoleranzen nach DIN 18203-3 (2008) zugleich hohe Anschlusssteifigkeiten realisieren.

Für Scher-Lochleibungsanschlüsse und für gleitfeste Anschlüsse werden Gleichungssysteme als auch Bemessungstabellen entwickelt. Das Potential KP-verstärkter Stäbe wird am Beispiel modular aufgebauter Fachwerkträger mit Scher-Lochleibungsverbindungen erörtert.

Abschließend werden ringförmige Knotenanschlüsse aus KP vorgestellt. Mit diesen organisch geformten Freiformknoten können Stäbe unterschiedlichen Querschnitts, unterschiedlicher Länge und unter unterschiedlichen Winkeln gestoßen werden.

Mit dieser Arbeit wird die Grundlage zur Bemessung von Holztragwerken mit Knotenverstärkungen aus KP geschaffen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Umfang der Arbeit.....	1
1.2	Aufbau und Methodik der Arbeit	4
2	Stand der Technik im Holzbau	6
2.1	Stabtragwerke.....	6
2.2	Stabanschlüsse.....	6
2.3	Probleme und Handlungsbedarf	11
3	Grundlagen.....	25
3.1	Holz	26
3.2	Kunstharzpressholz (KP).....	33
3.3	Einfluss der Materialeigenschaften auf den Klebverbund.....	41
3.4	Materialauswahl für die Stabverstärkung	49
3.5	Berechnung charakteristischer Kennwerte nach DIN EN 1058: 2010.....	51
3.6	Mechanische Untersuchungen an KP.....	53
4	Klebsverbindungen in Faserlängsrichtung	59
4.1	Schäftung	59
4.2	Keilzinkenverbindung.....	63
4.2.1	Verwendung und Herstellung.....	64
4.2.2	Wirkungsweise	66
4.2.3	Spannungsverteilung in der Klebstofffuge	68
4.2.4	Bruchbild und Versagensursachen	72
4.2.5	Ansätze zur Optimierung.....	74
4.2.6	Einflussfaktoren auf die Festigkeit der Keilzinkenverbindung	75
4.2.7	Dämpfung des hygroskopischen Verhaltens durch Oberflächenanstriche	123
4.2.8	Fazit zu Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP	132
5	Anschluss mit zylindrischen Verbindungsmitteln in KP	134
5.1	Spannungsverteilung um ein zylindrisches Verbindungsmittel	134
5.2	Herleitung des Spannungszustandes.....	136
5.3	Bemessung von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln nach Johansen.....	141
5.4	Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel	144
5.5	Zusammenfassung und Folgebetrachtungen	151
5.6	Lochleibungsfestigkeiten von KP	153
5.7	Lochleibungsversuche im Maßstab 1:1	167
5.8	Fazit zu den Lochleibungsversuchen	170

6	Konstruieren mit KP verstärken Stäben.....	172
6.1	Lochleibungsanschlüsse	172
6.2	Gleitfeste Anschlüsse aus KP.....	198
6.3	Zerlegbare Freiformanschlüsse mit KP-Ringknoten	216
7	Schlussbetrachtung und Zusammenfassung.....	229
8	Literaturverzeichnis.....	232
Anhang		A-1
1	Tabellen.....	A-1
2	Bemessung	A-5
2.1	Bemessung des Stabdübel- und des Bolzenanschlusses	A-5
3	Dokumentation der Prüfreihen	A-9
3.1	Versuche zum hygroskopischen Verhalten	A-10
3.2	Zugversuche in Anlehnung an DIN 52188 (1979) und DIN EN 408 (2012).....	A-17
3.3	Biegeversuche in Anlehnung an DIN 52186 (1978) und DIN EN 408 (2012).....	A-26
3.4	Druckversuche in Anlehnung an DIN 52185 (1976) und DIN EN 408 (2012)	A-35
3.5	Lochleibungsversuche in Anlehnung an DIN EN 383 (2007).....	A-36
3.6	Versuche an gleitfesten Verbindungen in Anlehnung an DIN EN 408 (2012).....	A-40
3.7	Bauteilversuche in Anlehnung an DIN EN 408 (2012)	A-44
4	Prüfprotokolle	A-45

Abbildungsverzeichnis

Abb.	Titel	Quelle	Seite
1	a) Stirnholzkontakt; b) Druck-Zange; c) Zug-Zange; d) Zug-Lasche	eigene Abbildung	6
2	Stahlblech-Stabdübel-Anschluss	Heco, 2019 ^(*)	7
3	Greimbau-Anschluss	links: Arbeitsgemeinschaft Holz, 1974, S. 18 ^(**) ; rechts: Entwicklungsgemeinschaft Holzbau, 1991, S. 26	8
4	Anschluss mit Nagelplatten	flickr, 2018 ^(*)	8
5	Anschluss mit Multikrallendübel (MKD)	links: Colling, 2008, S. 200 ^(*) ; rechts: Staib et al., 2008, S. 64	9
6	Anschluss mit eingeklebten Lochblechen	eigene Abbildung	9
7	Anschluss mit eingeklebten Stahlstäben	Steiger, 2012 ^(*)	10
8	GSA-Systemanschluss	GSA, 2019 ^(*)	10
9	Normalkraftstöße und Querschnittsverlust in rot. Links gerades Blatt, rechts: Stabdübel-Stahlblech-Anschluss	eigene Abbildung	11
10	Spannungsverteilung im Bereich des Verbindungsmittels. Rot = max / Zugkraft, blau = min / Druckkraft	eigene Abbildung	13
11	Anschlussblech-Stabanker-Zugstab-System	Besista, 2018 ^(*)	14
12	Anschlussausführung mit Stabdübeln (links) und Passbolzen (rechts)	eigene Abbildung	15
13	Tamedia Hauptquartier, Zürich, Konstruktionsmodell nach Shigeru Ban	mod. nach proholz, 2019 ^(*)	16
14	Schema Addition hochfester Werkstoffe am Stabende	eigene Abbildung	17
15	Links: konventioneller Anschluss; rechts: verstärkter Anschluss mit eingeklebten Bau-Buchen-Furniersperrholzplatten	mod. nach Ehlbeck & Werner, 1994, S. 6-7	18
16	Verstärkter Anschluss mit aufgeklebten Paßfurniersperrholzplatten	mod. nach Ehlbeck & Werner, 1994, S. 6-24	19
17	Prinzip der Rohrdübelverbindung	Leijten, 1999	20
18	Links: Verstärkung mittels Nageldübel, rechts: Lastverformungsdiagramme im Vergleich	mod. nach Blaß, Schmid & Werner, 2001, S. 11	21
19	Verstärkungsvarianten mit Schichtholz und Furnierplatten	Gehri, 1982 zitiert nach Rug, 1985, S. 52	21
20	Verstärkung mit GFK-Pads	Heiduschke, 2011, S. 149	22
21	Möglichkeiten zur Verstärkung nativer Holzquerschnitte durch KP	Röver, 2017	25
22	Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften von Fichte, (a) relative Änderung des Elastizitätsmoduls, (b) relative Änderung der Festigkeit	Glos & Henrici, 1990, zitiert nach Niemz & Sonderegger, 2017, S. 183	27

23	Einfluss des Feuchtegehaltes auf die mechanischen Festigkeiten bzw. Elastizitätsmodul bei Fichte (gültig für fehlerfreies Holz)	Kühne 1995, zitiert nach Rug & Mönck, 2015, S. 25	28
24	Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur	Loughborough, 1949, zitiert nach Gamper et al., 2017, S. 13	29
25	Beispielhafte Veränderung der Feuchtegradienten in Brett-schichtholz-Bauteilen	Möhler & Steck, 1980, zitiert nach Gamper et al., 2012, S. 15	30
26	Oben: Jahresverlauf von Temperatur und Luftfeuchte für Schleswig-Holstein und für Oberbayern. Unten Holz-ausgleichsfeuchten in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte	mod. nach Trübswetter, 2009, S. 29	31
27	Dauerstandzugfestigkeit von Kiefernholz	eigen Abbildung, nach Riechers, 1938, zitiert nach Ylinen, 1957	33
28	Vergleich des Querschnitts und der Zellstruktur vor und nach der Verdichtung	Song et al., 2018, S. 225 (**)	34
29	Qualitative Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte auf die Steifigkeit von Lignin, Hemizellulose und Zellulose	Olsson et al. , 1997, zitiert nach Morsing & Hoffmeyer, 1998, S. 41	35
30	Lichtmikroskop-Aufnahme der Zellwandstruktur von „sugi sapwood“ im Querschnitt. Verwendung von Kunstharzpolymer mit niedrigem Molekulargewicht von 290	Furuno et al., 2004 (**)	36
31	Prinzip-Skizze zum Aufbau von KP	Niemz & Sonderegger, 2017, S. 50	36
32	Qualitatives Verformungsverhalten von KP BE 335-1	eigene Abbildung	38
33	Arten des Materialversagens von KP	eigene Abbildung	38
34	Schichtfehler im Aufbau von KP	eigene Abbildung	40
35	Typen von Furnierstößen	Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 10	40
36	Auffeuchtung von KP, Fichte und Buche bei vollständiger Lagerung unter Wasser	eigene Abbildung	43
37	Auffeuchtung von KP bei vollständiger Lagerung unter Wasser	eigene Abbildung	43
38	Volumenzunahme bei Auffeuchtung darrtrockener Prüfkörper aus Fichte, Buche und KP	eigene Abbildung	44
39	Quellmaß von KP in Abhängigkeit der Raumrichtungen (gestrichelte Linien = KP BE 335-1 50 %/50 %)	eigene Abbildung	45
40	Quellmaß in Abhängigkeit der Zeit bei Buche, Fichte, KP BE 335-1 50 %/50 %	eigene Abbildung	45
41	Auffeuchten darrtrockener Prüfkörper im Normalklima	eigene Abbildung	46
42	Wasseraufnahme über Axial-, Radial- und Tangentialfläche bei nativem Fichten- und Buchenholz	eigene Abbildung	47
43	Wasseraufnahme über Axial-, Radial- und Tangentialfläche bei KP BE 335-1	eigene Abbildung	47

44	Qualitative Belastung als Scherspannung auf die Klebfuge infolge unterschiedlichem Schwind- und Quellverhaltens bei einer Flächenverklebung zwischen Fichte und KP. Klebung bei 12 % Holzfeuchte	eigene Abbildung	48
45	Delamination der Klebfuge infolge des Holzschwindens	eigene Abbildung	49
46	Darstellung ausgewählter mechanischer Eigenschaften auf Basis der für Tabelle 6 durchgeführten Untersuchungen	eigene Abbildung	51
47	Vergleich der Druckfestigkeit von KP in Furnierrichtung, Buche und Fichte in Faserrichtung	eigene Abbildung	53
48	Druckversuch: Bruchbilder von KP (links), Buche (Mitte) und Fichte (rechts)	eigene Abbildung	53
49	Vergleich der Spannungs-Weg-Kurven von KP (mit verschiedenem Aufbau) und nativem Holz (Fichte, Buche)	eigene Abbildung	54
50	Oben: Spannungs-Weg-Diagramm von KP BE 335-1, 67 % Längslagen / 33 % Querlagen im Zugversuch; unten KP mit und ohne Risse in den Querlagen	Graf, Röver & Schmeing, 2016, S. 9	55
51	Darstellung der Festigkeitskennwerte von Prüfkörpern ohne Schichtfehler und Prüfkörper mit unterschiedlichen Arten und unterschiedlicher Anzahl von Schichtfehlern	eigene Abbildung	56
52	Modell zur Beschreibung lokaler Dichtespitzen bei Furnierüberlappungen	eigene Abbildung	56
53	Schäftungsverbindung zwischen nativer Fichte und KP	eigene Abbildung	59
54	Schema zur Ausbildung von „Adhäsionsbrücken“	eigene Abbildung	59
55	Darstellung von Kräften in der Klebfuge einer Schäftung	eigene Abbildung	60
56	Festigkeit unterschiedlicher Klebverbindungen; blau: Keilzinkenverbindung, orange: Schäftung	eigene Abbildung	61
57	Keilzinkenverbindung des Typs I-15 zwischen Fichte und KP	eigene Abbildung	63
58	Verlauf der Zugfestigkeit über die Stablänge einer keilgezinkten Brettlamelle	Gehri, 1981, zitiert nach Kessel, 2014, S. 111	63
59	Keilzinkung – Begriffe	eigene Abbildung	64
60	Stationen der Herstellung von Keilzinkenverbindungen. Hier Scannen der Oberflächen	eigene Abbildung	65
61	Stationen der Herstellung von Keilzinkenverbindungen. Hier Sägen, Fräsen und Kleben	eigene Abbildung	65
62	Keilzinkenfräse am T-Lab der TU Kaiserslautern	eigene Abbildung	65
63	Darstellung von Kräften in der Klebfuge einer Keilzinkenverbindung	eigene Abbildung	66
64	Keilzinkenverbindung: Zinkenspitze b_t und Zinkenteilung p	eigene Abbildung	67
65	Darstellung einer einschnittig überlappten Klebung	eigene Abbildung, nach Habenicht, 1997, S. 415	68
66	Verformungsverhalten einer Klebfuge in einer einschnittig überlappten Klebung (links: oben: elastische Dehnung der Querschnitte und der Klebfuge, Mitte: elastische Dehnung der Klebfuge, unten: Klebung ohne Belastung / rechts: Darstellung der Scherwinkel in der Klebfuge)	eigene Abbildung	69

67	Schubspannungsverlauf in Klebfuge, links: Schubspannung durch Schubverformung der Klebschicht; rechts: Schubspannung durch Schubverformung der Klebschicht und durch Klebstoffverformung infolge Fügeteildehnung	eigene Abbildung, nach Habenicht, 1997, S. 418	69
68	Darstellung einer Schäftungsverbindung	eigene Abbildung	70
69	Verformungsverhalten der Klebfuge in einer Schäftungsverbindung (oben: elastische Dehnung der Querschnitte und der Klebfuge, Mitte: elastische Dehnung der Klebfuge, unten: Klebung ohne Belastung)	eigene Abbildung	70
70	Keilzinkenverbindung. Modell: Aufteilung in Schäftungs- und Überlappungsbereiche	eigene Abbildung	71
71	Spannungsverteilung in einer Keilzinkenverbindung des Typs I-15; $q = 10 \text{ N/mm}^2$; Material: Fichte	eigene Abbildung	71
72	Bruchbilder an Keilzinkenverbindungen	eigene Abbildung	72
73	Schema der Versagensarten von Keilzinkenverbindungen: Hauptspannung und Bruchauslöser	eigene Abbildung, beinhalte Abbildungen nach Franke et al., 2013, S. 42	74
74	Einflussfaktoren auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung	eigene Abbildung	76
75	Wirkungsgrad unterschiedlicher Keilzinkenprofile. Holzart Pappel; Klebstoff Aerodux, Profil 7,5: $l = 7,5 \text{ mm} / p = 2,5 \text{ mm} / t = 0,2 \text{ mm}$; Profil 15: $l = 15 \text{ mm} / p = 3,8 \text{ mm} / t = 0,6 \text{ mm}$; Profil 20: $l = 20 \text{ mm} / p = 6,2 \text{ mm} / t = 1 \text{ mm}$	mod. nach Castro & Paganini, 1997	80
76	Wirkungsgrad keilgezinkter Querschnitte in Fichtenholz	eigene Abbildung	81
77	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Geometrie des Zinkenprofils	eigene Abbildung	82
78	Links: geschlossener Zinkengrund, rechts: offener Zinkengrund	eigene Abbildung	83
79	Gegenüberstellung von geschlossenem (links) und offenem Zinkengrund (Mitte und rechts), grün: Klebfuge	in Anlehnung an Aicher & Radovic, 1999	83
80	Druck- und Zugfestigkeit in Keilzinkenverbindungen	eigene Abbildung	85
81	Versagen der Keilzinkenverbindung unter einer Druckbeanspruchung	eigene Abbildung	85
82	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Festigkeit	Bodig & Jayne, 1993, zitiert nach Niemz & Sonderegger, 2017, S. 352	86
83	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Prüfgeschwindigkeit	eigene Abbildung	86
84	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung	eigene Abbildung	87
85	Klebstoffbenetzung der Oberflächen. Es sind die Zinkenflächen eines einzelnen Prüfkörpers dargestellt	eigene Abbildung	88
86	Empfohlener Pressdruck (1) bei der Verklebung in Abhängigkeit von der Zinkenlänge (2), die Empfehlungen gelten für die Verklebung von Nadelholz	DIN EN 15497, 2014, S. 44	88

87	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit vom Pressdruck p bei der Verklebung von KP mit KP	eigene Abbildung	89
88	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit vom Pressdruck p bei der Verklebung von KP mit KP, Ableitung Regressionsgleichung	eigene Abbildung	90
89	Einfluss der Presszeit auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung in Pappelholz	Castro & Paganini, 1997	90
90	Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit (Cutting speed) und Materialvorschub (Chip-load) auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen	Bustos et al., 2004	91
91	Bereich der Holzschädigung: links: Schnittgeschwindigkeit: 1676 m/min; Materialvorschub 0,64 mm/U: Holzschädigung 70 µm; rechts: Schnittgeschwindigkeit: 3770 m/min; Materialvorschub 0,64 mm/U: Holzschädigung 281 µm	Bustos et al., 2004 (*)	91
92	Links: Standzeit in Stunden der Keilzinkenfräser in Abhängigkeit vom Vorschub. Rechts: Standzeit in Stunden der Keilzinkenfräser in Bezug auf die Werkzeugdrehzahl	Aigner et al., 2009	92
93	Alterung einer frisch angeschnittenen Holzzelle	Müller et al., 2014	94
94	Schichtfehler nahe des Keilzinkengrundes	eigene Abbildung	94
95	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Klebstoffart	eigene Abbildung	95
96	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Materialkombination	eigene Abbildung	96
97	Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Zug-Elastizitätsmodul der Keilzinkenstöße bei den Versuchskollektiven a) I-20 und b) I-20m Profil	Aicher & Radovic, 1999	98
98	Keilzinkenbiegefestigkeit in Abhängigkeit vom dynamischen Biege-Elastizitätsmodul; Untersuchung nach Herkunft	Blaß & Frese, 2006	98
99	Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit vom Elastizitätsmodul	eigene Abbildung	100
100	Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt (Fichte) und der Klebfuge (Fichte) in Abhängigkeit der Werkstoffkombination	eigene Abbildung	101
101	Schema Klebfläche bei Holzklebungen	eigene Abbildung	102
102	Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von den Dichten der Fügeteilpartner	eigene Abbildung	103
103	Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von den Elastizitätsmoduln der Fügeteilpartner	eigene Abbildung	104
104	Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von der Dichte der Fügeteilpartner	eigene Abbildung	105
105	Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit von der Holzdichte	eigene Abbildung	106
106	Bruch einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte & Fichte	eigene Abbildung	106
107	Schema Verklebung	eigene Abbildung	107
108	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit zwischen Fichte und KP von der Jahrringbreite	eigene Abbildung	108
109	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Holzfeuchte	eigene Abbildung	109
110	Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Holzfeuchte	eigene Abbildung	110
111	Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen KP und Fichte	eigene Abbildung	111

112	Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von der Dichte und der Holzfeuchte des nativen Fichtenholzes	eigene Abbildung	111
113	Prinzip Schwindspannung in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP	eigene Abbildung	112
114	Schwindverformung in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP	eigene Abbildung	113
115	Keilzinkenverbindung nach der Kochbehandlung (Reihe W4)	eigene Abbildung	114
116	Vergleich der Chargen N, W1, W2, W3, W4	eigene Abbildung	115
117	Darstellung der Ergebnisse aus den Versuchen der Reihen N, W1, W2, W3, W4	eigene Abbildung	115
118	Auswirkung von Holzfeuchteveränderungen auf die Keilzinkenfestigkeit zwischen KP und Fichte	eigene Abbildung	117
119	Intakte Klebfuge zwischen Fichte und KP	eigene Abbildung	118
120	Riss nahe der Klebfuge	eigene Abbildung	118
121	Querschnitt im nativen Holz	eigene Abbildung	118
122	Kombinationsbruch	eigene Abbildung	119
123	Aufnahmen des Zinkengrundes (a) und der Zinkenspitze (b) von nativem Nadelholz bei der Verklebung mit KP	eigene Abbildung	119
124	Auswirkung zyklischer Holzfeuchteveränderungen auf die Keilzinkenfestigkeit zwischen KP und Fichte	eigene Abbildung	119
125	Spannungsrelaxation bei Kiefernspiltholz	Perkitny & Hoffmann, 1974	122
126	Hygroskopisches Verhalten von unbehandelten und behandelten Holzoberflächen	eigene Abbildung	125
127	Temperatur und Luftfeuchte an einer Richtung Norden orientierten Holzfassade	eigene Abbildung	126
128	Verlauf der Holzfeuchte in der Eissporthalle Buchloe	eigene Abbildung, nach Gamper et al., 2012, S. A48 ff.	127
129	Modell zur Prognose der Holzfeuchte in der Eissporthalle Buchloe nach Einsatz von Oberflächenanstrichen	eigene Abbildung, nach Gamper et al., 2012, S. A48 ff.	129
130	Modell für die Eissporthalle Buchloe, Dämpfungseffekt der Oberflächenanstriche	eigene Abbildung	129
131	Feuchteverlauf über die Trägerquerschnittsfläche	eigene Abbildung	131
132	Spannungszustand im Holzteil in Abhängigkeit der Art der Krafteinleitung durch den Bolzen (Zug oder Druck): schematische Darstellung	mod. nach Gehri, 1980	135
133	Vergleichsspannungen (von Mises) in einem Nadelholzquerschnitt im Bereich des zylindrischen Verbindungsmittels	eigene Abbildung	135
134	Links: Stromlinienanalogie / rechts: Spannungsverteilung in einem gelochten Zugstab	links: Stahl, 2015, S. 69 (*) rechts: Schäfer, 1952	136
135	Einfluss der Kerbform auf die Höhe und Verteilung der Längsspannungen. a) = Flachkerbe; b) Rundkerbe; c) Rechteckkerbe; d) = Spitzkerbe	Bürgel, 2005, S. 117 f.	138

136	Geometrische Herleitung der Spannungsverteilung in der Lochleibung und dem Vorholz. Links: Ausstrahlung der Kraft; rechts: Aufteilung der Kräfte in Normal-X- und Normal-Y-Richtung	eigene Abbildung	139
137	Spannungsverteilung im Druckbereich der Lochleibung bei homogenen isotropen Werkstoffen und bei unendlichem Randabstand a_3 und a_4	eigene Abbildung	140
138	Versagensmöglichkeiten von Bauteilanschlüssen mit zylindrischen Verbindungsmitteln	eigene Abbildung nach Fahlbusch, 1949, zitiert nach Ehlbeck & Werner, 1994 ^(*)	141
139	Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Rohwichte	Fahlbusch, 1951, zitiert nach Kollmann, 1955, S. 887	144
140	Lochleibungsfestigkeit für Fichte für Verbindungsmittel mit $d = 12 \text{ mm}$	Spörk, 2007, zitiert nach Hübner, 2013, S. 218	144
141	Abhängigkeit der Lochleibungsfestigkeit von der Holzfeuchte	Hübner, 2013, S. 244	145
142	Abhängigkeit der Spaltkraft vom Randabstand a_3	Fahlbusch, 1951, zitiert nach Kollmann, 1955, S. 889	146
143	Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Bolzendurchmessers	Fahlbusch, 1951, zitiert nach Kollmann, 1955, S. 889	146
144	Einfluss des Abstandes a_1 auf die Tragfähigkeit	Colling et al., 2013, S. 58	147
145	Einfluss von Ungenauigkeiten zwischen den Bohrungen der Laschen und des Holzes	mod. nach Mischler, 1998, S. 59	148
146	Relative Lochleibungsspannung	Trayer, 1932, S. 8	149
147	Relative Lochleibungsspannung in Abhängigkeit der Fließgrenze. A = 125.000 Pfund/Inch ² (860 N/mm ²) und B 45.000 Pfund/Inch ² (310 N/mm ²)	Trayer, 1932, S. 21	149
148	Spannungsverteilung um das Verbindungsmittel längs der Stabachse für Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. Blau = Druck; rot = Zug	eigene Abbildung	150
149	Spannungsverteilung um das Verbindungsmittel quer der Stabachse für Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. Blau = Druck; rot = Zug	eigene Abbildung	150
150	Stabwerkmodelle für einen Druckanschluss (links) und einen Zuganschluss (rechts) in Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. (grün = Druck; rot = Zug)	eigene Abbildung	151
151	Querzugspannungsverteilung in Abhängigkeit der Reibung zwischen Manteloberfläche und Lochleibung. Oben: $\mu = 0$; unten: $\mu = 0,339$	Schmid, 2002, S. 23 f.	151
152	Randabstände für die unterschiedlichen Versuche zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit	DIN EN 383, 2007, S. 6	153
153	Ermittelte Lochleibungsfestigkeiten im Druckversuch	eigene Abbildung	155
154	Mittlere Lochleibungsfestigkeit an KP Dehonit BE 335-1 67 % L / 33 % Q	eigene Abbildung	156

155	Modifizierter Lochleibungsdruckversuch, links: vor Versuchsbeginn; rechts: Bruch nach Erreichen der Höchstlast	mod. nach Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 19 ^(*)	156
156	Bezogene Lochleibungsfestigkeit f_h^*	eigene Abbildung	158
157	Bruchbilder nach Prüfung von Bolzen mit $d = 20 \text{ mm}$	mod. nach Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 20	158
158	Vergleichsfestigkeiten	eigene Abbildung	160
159	Bezogene Lochleibungsfestigkeiten in Abhängigkeit der Fournierausrichtung	eigene Abbildung	161
160	Abhängigkeit der bezogenen Lochleibungsfestigkeit von der Beschaffenheit der Manteloberfläche	eigene Abbildung	162
161	Einfluss der Bolzenschlankheit auf die Lochleibungsfestigkeit von KP	eigene Abbildung	163
162	Einfluss der Verbindungsmittelschlankheit auf die Vergleichsfestigkeit	eigene Abbildung	163
163	Bruchbilder an Zangenanschlüssen von KP-Querschnitten, links $\lambda = 1,25$; rechts $\lambda = 3,75$	eigene Abbildung	164
164	Ergebnisse aus Bauteilversuchen an mit KP verstärkten Doppelstäben mit mittigem Stahlblech	eigene Abbildung	168
165	Bauteilversuch an einem KP-verstärkten Stabpaar, mit $A = 2 \times (b = 60 \text{ mm}) \times (h = 120 \text{ mm})$	eigene Abbildung	169
166	Kraft-Weg-Diagramm der Bauteilversuche	mod. nach Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 26	169
167	Darstellung der Spannungsverteilung auf der Mantelfläche; oben: Stabdübel-Stahlblechanschluss $b \times h = 2 \times 6 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$, unten: Greimbauweise $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$; $d = 20 \text{ mm}$	eigene Abbildung	172
168	Darstellung der Spannungsverteilung in der Lochleibung; oben: Stabdübel-Stahlblechanschluss $b \times h = 2 \times 6 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$, unten: Greimbauweise $12 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$; $d = 20 \text{ mm}$.	eigene Abbildung	173
169	Druck- und Zugspannungsverteilung	eigene Abbildung	174
170	Fachwerk mit zwei Gefachen	eigene Abbildung	178
171	Fachwerk mit n Gefachen	eigene Abbildung	178
172	Fachwerk mit zwei Gefachen	eigene Abbildung	180
173	Fachwerkfaktor k_f als Quotient aus Zugkraft im Untergurt- und Druckkraft im Obergurtstab für symmetrische Fachwerke mit quadratischen Gefachen	eigene Abbildung	181
174	Transportoption mit Einzelfahrzeugen	eigene Abbildung	184
175	Transportoption mit Sattelschlepper	eigene Abbildung	185
176	Maximale Linienlast von Modulsystemen unterschiedlichen Querschnitts und unterschiedlicher Spannweite für den Standardfall	eigene Abbildung	186
177	Planungshilfe zur „Abschätzung“ möglicher Trägerabstände in Abhängigkeit der Dachlast, der Systemspannweite und des Modultyps	eigene Abbildung	187

178	Modulstoß	eigene Abbildung	190
179	Geometrie Anschlussblech (S355), links Anschluss Zugdiagonale, rechts: Anschluss Zuggurt	eigene Abbildung	191
180	Abmessungen des verstärkten Stabanschlusses, Maße in [mm]	eigene Abbildung	193
181	Geometrie Anschlussblech (S355)	eigene Abbildung	194
182	Explosionszeichnung Modulstoß, hier in Feldmitte	eigene Abbildung	196
183	Explosionszeichnung Stabanschluss Pfosten und Diagonale, hier außerhalb der Feldmitte	eigene Abbildung	196
184	Ausbildungen der Knoten	eigene Abbildung	197
185	Wirkprinzip nichtvorgespannter und vorgespannter Schraubenverbindungen	eigene Abbildung nach Würth, 2019, S. 1805	199
186	Spannungen in Blechen bei gleitfesten Verbindungen (rechts) und Scher-Lochleibungsverbindungen (links)	Kindmann & Stracke, 2009 & Petersen, 2013, zitiert nach Ebert et al., 2014	199
187	Abhängigkeit der Materialbeanspruchung vom Schraubendurchmesser / Schraubenfestigkeit und Art der Unterlegscheibe	eigene Abbildung	200
188	Versuchsaufbau zur Ermittlung von Kennwerten vorgespannter Stahlschrauben als Verbindungsmittel zwischen KP und Stahlblech, als Referenz wurden Fichtenquerschnitte geprüft (t = 15 mm).	eigene Abbildung	202
189	Tragfähigkeit eines Zangenanschlusses mit Schrauben M20	eigene Abbildung	203
190	Kraft-Weg-Diagramme unterschiedlicher Material- und Vorspannkonfigurationen, bei gleicher Prüfkörpergeometrie.	eigene Abbildung	204
191	Vergleich von Kriechzahlen von Fichte, Lärche und KP	Hamann & Kubowitz, 2011	205
192	Zangenanschluss mit KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q auf glattem Stahlblech	eigene Abbildung	206
193	Kraft-Weg Diagramm	eigene Abbildung	206
194	Zugversuch an Blechen mit gerändelter Oberfläche	eigene Abbildung	208
195	Einfluss der Vorspannung auf die Tragfähigkeit von Zangenanschlüssen	eigene Abbildung	209
196	Vergleich Lochleibungsanschluss (orange) mit gleitfester Verbindung auf glattem Stahlblech (blau) und gleitfester Verbindung auf gerändeltem Stahlblech (schwarz)	eigene Abbildung	209
197	Zug-Zangenanschluss mit Schrauben M8, 8.8 in KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q auf gerändeltem Stahlblech	eigene Abbildung	211
198	Vergleich Lochleibungsanschluss (orange) mit gleitfester Verbindung auf gerändeltem Stahlblech nach t = 0d (blau), t = 35d (grün) und t = 105d (rot)	eigene Abbildung	211
199	Verlust der Haftreibung. Durchziehen der Rändelspitzen durch die KP-Oberfläche	eigene Abbildung	212
200	Zeitliche Entwicklung der Haftkraft	eigene Abbildung	213
201	Spannungsanalyse in einer Baumgabelung	eigene Abbildung	216
202	Geometrische Grenzen eines Druck-Druck-Druck-, eines Zug-Zug-Druck- und eines Zug-Druck-Druck-Anschlusses	eigene Abbildung	217

203	Anisotrope Elastizität (Polardiagramm) von Vollholz	mod. nach Baensch, 2015, S. 21	218
204	Buchenholz: Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Elastizitätsmodul	mod. nach Blaß et al., 2005, S. 20	219
205	Konstruktionsprinzip von Freiformanschlüssen mit KP-Druck-Ringknoten	eigene Abbildung	220
206	Visualisierung des Hallentragwerkes	eigene Abbildung	221
207	Konstruktionslogik und veränderbare Parameter	eigene Abbildung	222
208	Knotendetail der Trauf-, Firstgelenk- und Raumknoten	eigene Abbildung	222
209	Statisches Modell der Hallenstruktur	eigene Abbildung	223
210	Stab-, Auflager- und Gelenkkräfte	eigene Abbildung	225
211	Spannungsverteilung als Vergleichsspannung im Firstgelenk-knoten (oben), im Traufknoten (Mitte) und im Raumknoten (unten)	eigene Abbildung	226
212	Unterschiedliche Rotfärbungen der Prüfquader, links KP BE 335-1 67/33, mittig KP BE 335-1 50/50, rechts KP BE 335-1 33/67	eigene Abbildung	A-10
213	Trocknung von KP BE335-1, Buche, und Fichte über 8 Tage	eigene Abbildung	A-11
214	Trocknung von KP zur Ermittlung der Trocknungsdauer bis zum darrtrockenen Zustand	eigene Abbildung	A-12
215	Kollektiv der Prüfkörper das im Wasserbad gelagert wurde	eigene Abbildung	A-12
216	Kollektiv der Prüfkörper das im Klimaschrank gelagert wurde	eigene Abbildung	A-13
217	Kollektiv der Prüfquader zur Dokumentation des Auffeuchteverhaltens über eine einzelne Seite: links KP, rechtes Buche nativ. Anmerkung, die Fichtenprüfkörper sind hier nicht abgebildet	eigene Abbildung	A-14
218	Links: Prüfkörper 1 A-C und 2 A-C vor dem Anstrich; rechts: Prüfkörper 1 A-E und 2 A-E nach dem Anstrich	eigene Abbildung	A-14
219	Links: Ölauftrag je Arbeitsschritt am Prüfkörper 1C und 2C, rechts: Ölaufnahme beim Erstauftrag am Prüfkörper 1B, 2B, 1C und 2 C. Produkt Steinert Drechsleröl	eigene Abbildung	A-15
220	Dokumentation der Holzfeuchte als Sorptionskurven	eigene Abbildung	A-15
221	Lagerung der Charge W4 in kochendem Wasser	Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 13 ^(*)	A-16
222	Seitenansicht der Prüfkörper mit Fehlstellen	eigene Abbildung	A-17
223	Versuchsaufbau der Reihen G, H, I, J. rechts: Prüfkörpergeometrie, G links, H, I, J, K rechts	eigene Abbildung	A-18
224	Geometrie der Prüfkörper B und C	eigene Abbildung	A-20
225	Hydraulische Pressvorrichtung im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG	Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 31 ^(*)	A-20
226	Prüfkörper Reihe O	eigene Abbildung	A-21
227	Optimierte Prüfkörpergeometrie	eigene Abbildung	A-22
228	Konditionierung der Chargen N, W1, W2, W3, W4	Röver, 2017 ^(*)	A-23

229	Links: Pressvorrichtung für die Verklebung von KP mit KP; rechts fertiger Zugprüfkörper. Weißer Pfeil: Hydraulikkolben; roter Pfeil: Kraftmessdose; blaue Pfeile: Spannblöcke zur Sicherung beider zu verklebender Querschnitte	Ludwig, 2015, S. 2 ^(*)	A-24
230	Bruchbilder bei Verklebungen mit einem Pressdruck von 1,54 N/mm (oben), 8,9 N/mm (Mitte), 15,4 N/mm (unten)	Ludwig, 2015, S. 8. f. & Graf, Röver & Schmeing, 2016, S. 6 ^(*)	A-25
231	Biegeversuch	Graf et al., 2018 ^(*)	A-26
232	Biegeversuch an nativem Buchenholz	eigene Abbildung	A-27
233	Pressvorrichtung für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen	eigene Abbildung	A-27
234	Biegeprüfung an Keilzinkenverbindungen zwischen Buche und Buche	eigene Abbildung	A-28
235	Dokumentation des Trocknungs-Auffeuchtezyklus im Klimaschrank	eigene Abbildung	A-30
236	Biegeprüfung an Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und K	eigene Abbildung	A-31
237	Prinzip der Prüfkörpergewinnung für die "Zweitprüfung"	eigene Abbildung	A-32
238	Biegeversuch an Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP, links Flachkantbiegeversuch, rechts Hochkantbiegeversuch	eigene Abbildung	A-32
239	Biegeprüfungen: links 4-P-Biegeprüfung an keilgezinktem Fichtenprüfkörper, rechts 3-P-Biegeprüfung an Fügepartner	eigene Abbildung	A-34
240	Druckversuch an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15	eigene Abbildung	A-35
241	Links: Versuchsaufbau, rechts Geometrie der Prüfkörper	eigene Abbildung	A-36
242	Vorrichtungen zur Durchführung von Lochleibungsversuchen, links: Prüfung der Durchmesser d = 8 mm und d = 10 mm, rechte Prüfung der Durchmesser d = 20 mm, d = 30 mm, d = 40 mm, d = 50 mm, d = 60 mm	eigene Abbildung	A-38
243	Lochleibungsversuche an Gewindeschrauben (links) und an glatten Bolzen (rechts) in KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q	eigene Abbildung	A-39
244	Versuchsaufbau zur Bestimmung des Schlankheitseffektes	eigene Abbildung	A-40
245	Versuchsskizze	eigene Abbildung	A-40
246	Varianten im Zugversuch. Links: (1) Doppelstab Fichte ohne Vorspannung. Mitte: (2) und (3) Doppelstab KP mit / ohne Vorspannung. Rechts: (4) Doppelstab KP mit Vorspannung und Unterlegscheiben aus Sandpapier	eigene Abbildung	A-41
247	Prüfkörper zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit vorgespannter Schrauben in Bauteilanschlüssen aus KP	eigene Abbildung	A-42
248	Auf Flächenrändel vorgespannte KP-Zange	eigene Abbildung	A-43
249	Skizze Versuch	eigene Abbildung	A-44

(*) Die Abbildung wurde an den Bildrändern zugeschnitten

(**) Die Abbildung stellt einen Teilausschnitt dar

Tabellenverzeichnis

Tab.	Titel	Quelle	Seite
1	Faustwerte für Querschnittsschwächungen bei zugbeanspruchten Bauteilen	Goris, 2012, Tafel 9.20	12
2	Mindestabstände nach DIN EN 1995-1-1 für Stabdübel- und Passbolzenanschluss	eigene Tabelle	15
3	Minderung der mechanischen Holzeigenschaften bei 100 °C gegenüber den Werten bei 20 °C	Glos & Henrici, 1990, zitiert nach Niemz & Sonderegger, 2017, S. 184	27
4	Rechenwerte für die Modifikationsbeiwerte k_{mod} für Holz, Holz- und Gipswerkstoffe	DIN EN 1995-1/NA, 2013, S. 19	32
5	Mechanische Kennwerte für die KP-Qualitäten BE335-1 und B340	eigene Tabelle	50
6	Optimale Schäftungswinkel zur Verklebung unterschiedlicher Holzarten. Festigkeiten nach DIN 68364 (2003)	eigene Tabelle	60
7	Tabellarische Zusammenfassung der Einflussfaktoren sowie deren Gewichtung	eigene Tabelle	76
8	Zulässige Profile für die Herstellung von Holz oder Holzwerkstoffen	eigene Tabelle	79
9	Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Profiltypen. Holzart Pappel, Klebstoff Aerodux, auf Basis der Daten von Castro & Paganini (1997)	eigene Tabelle	81
10	Gegenüberstellung des nominellen Reduktionsfaktors v_{nom} mit dem effektiven Reduktionsfaktor v_{eff} für $e = 0,08$	eigene Tabelle	84
11	Rechnerische Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung mit $E_{0,mean} = 11.000 \text{ N/mm}^2$ ($E_{t,fj} = 11.330 \text{ N/mm}^2$)	eigene Tabelle	99
12	Konditionierung der Prüfkörper während der Herstellung und der Prüfung	eigene Tabelle	114
13	Behandlung der Prüfkörper	eigene Tabelle	123
14	Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Lochleibungsanschlüssen in nativem Holz	eigene Tabelle	152
15	Dokumentation der Vorholzbrüche	eigene Tabelle	159
16	Vergleich der Ergebnisse der charakteristischen Tragfähigkeiten F_K an Anschlüssen mit Gewindeschrauben M8, 8.8 nach der Johansen-Gleichungen mit den Ergebnissen der Versuchsreihen	eigene Tabelle	165
17	Vergleichsfestigkeit des verstärkten Anschlussbereiches bei $a_3 = 1,5 \times d$; und $t = 1,5 \times d$	eigene Tabelle	166
18	Tabellarische Übersicht zur Versuchsreihe Bauteilversuch d 40	eigene Tabelle	170
19	Bemessung der drei Anschlüsse	eigene Tabelle	198
20	Effektive Stablänge bei der die Tragfähigkeit unter einer Druckbeanspruchung und Zugbeanspruchung gleich sind	eigene Tabelle	183
21	Bemessungstabelle für mit KP verstärkte Stäbe mit quadratischem Querschnitt	eigene Tabelle	183

22	Bemessungstabelle im Standardfall für die KP verstärkten Holzquerschnitte (C24) mit 120 mm / 120 mm, 180 mm / 180 mm und 240 mm / 240 mm	eigene Tabelle	187
23	Möglicher Trägereinsatz	eigene Tabelle	197
24	Überblick über ausgewählte mechanische Kennwerte von Fichte und KP. (*): BE 335-1 67 % L / 33 % Q	eigene Tabelle	198
25	Schraubenvorspannkraft FV und des Anziehmomentes MA	eigene Tabelle	201
26	Kriechzahlen von KP, Fichte und Lärche	Hamann & Kubowitz, 2011	204
27	Mögliche Lastfälle	eigene Tabelle	223
28	ks-Wert bei unbekanntem Variationskoeffizient	eigene Tabelle, nach Klöck, 2004	A-1
29	Knickbeiwert k_c als Funktion der Schlankheit λ für die Festigkeitsklasse C24	Franke, 2010, S. 6	A-1
30	Übersicht der Materialparameter (Mittelwerte) für Simulationsstudien	eigene Tabelle	A-2
31	Übersicht der Materialparameter für statische Nachweise	mod. nach Goris, 2012, Tafel 9.8	A-2
32	Ergebnisse aus den Lochleibungsversuchen von $d = 8$ mm bis $d = 40$ mm	eigene Tabelle	A-3
33	Ergebnisse aus den Lochleibungsversuchen von $d = 50$ mm bis $d = 60$ mm	eigene Tabelle	A-4
34	Kennwerte der bezogenen Lochleibungsfestigkeit und der Vergleichsfestigkeit aus Druckversuchen	eigene Tabelle	A-4
35	Prüfkörper für die Lagerung im Wasserbad, Variante 1	eigene Tabelle	A-13
36	Prüfkörper für die Lagerung im Klimaschrank, Variante 2	eigene Tabelle	A-13
37	Prüfkörper für die Lagerung im Klimaschrank, Variante 3	eigene Tabelle	A-13
38	Übersicht zu den Versuchsreihen	eigene Tabelle	A-17
39	Prozessparameter bei der Herstellung der Prüfkörper	eigene Tabelle	A-19
40	Konditionierung der Prüfkörper während der Herstellung und der Prüfung	eigene Tabelle	A-22
41	Dichte und Elastizitätsmodul der Einzelquerschnitte	eigene Tabelle	A-33
42	Prüfkörperbildung	eigene Tabelle	A-34
43	Durchgeführte Versuche zylindrischer Verbindungsmittel in KP	eigene Tabelle	A-37

1 Einleitung

1.1 Motivation und Umfang der Arbeit

Die Motivation zu dieser Arbeit liegt in der Steigerung der stofflichen Substitution energieintensiv hergestellter Bauprodukte durch reversible Leichtbaukonstruktionen aus Holz. Eine Marktetablierung solcher Konstruktionen setzt voraus, dass sie im Vergleich zu gängigen Holzkonstruktionen technische, ökologische als auch ökonomische Vorteile mit sich bringen. Diese Arbeit setzt sich nachfolgend mit diesen aufgeführten Aspekten auseinander und trägt somit zu einer möglichen Marktetablierung reversibler Leichtbaukonstruktionen aus Holz bei.

Die Kaufentscheidung für ein Bauprodukt wird nach Bachler (2007, zitiert nach Bachler, 2009, S. 92) in erster Linie durch den Kaufpreis und damit durch die Wirtschaftlichkeit eines Bauproduktes im Vergleich zu anderen Bauprodukten bestimmt. Die Wirtschaftlichkeit einer Tragstruktur wird von vielen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören der Einzelpreis der Systemelemente, aus denen sich die Tragstruktur aufbaut, die Planungs- und Bemessungskosten, die Kosten für die Montage (Handwerker, Kräne, etc.), die Kosten für den Transport der Bauteile vom Werk bis zur Baustelle (Schwertransport, Transport mit Überlänge, etc.), die Instandhaltungskosten während der Nutzungsphase und die Kosten für den Rückbau sowie für das Recycling. Für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer jeden Tragstruktur müssen demnach stets die jeweiligen individuellen Rahmenbedingungen beachtet und die Einflussfaktoren in Abhängigkeit der Rahmenbedingungen gewichtet werden.

1.1.1 Ist-Zustand

In Industrienationen können mit einer industriellen und weitgehend automatisierten Herstellung die Kosten gegenüber individueller, personal- und damit lohnkostenintensiver Herstellung minimiert werden. Weitspannende Tragsysteme aus Holz werden aus diesem Grund im sichtbaren Bereich gegenwärtig vorwiegend als weitspannende Brettschichtholz-Vollwandträger ausgeführt (Schwaner, 2009, S. 1056; Blaß, 2009, S. 1171), da diese die Vorteile einer einfachen Bemessung und einer effizienten Herstellung verbinden. Obwohl aufgelöste Tragstrukturen nur einen Bruchteil des Materials von Vollwandträgern gleicher Tragfähigkeit benötigen, sie also statisch effizienter und ökologisch als ressourcenschonender zu bewerten sind, können durch die Einsparung des relativ günstigen Werkstoffs Holz die Mehrkosten durch höhere Planungs- und Ausführungskosten in der Regel nicht kompensiert werden. Lediglich im nicht sichtbaren Bereich haben Fachwerkbinder mit Nagelplattenverbindungen größere Marktanteile (Schwaner, 2009, S. 1056).

Aufgelöste Tragstrukturen aus Holz lassen sich nur durch die Addition einzelner Stäbe realisieren, die jeweils miteinander verbunden werden müssen. Üblicherweise führt man die Verbindungen für Strukturen im sichtbaren Bereich mit einer Vielzahl stiftförmiger Verbindungsmittel, wie Stabdübel oder Bolzen, aus. Die Anzahl und die Positionierung der stiftförmigen Verbindungsmittel richtet sich nach der Größe der Stabkraft, dem Stabquerschnitt, der Holzart, der Art des Verbindungsmittels und der Anschlussausführung. Die notwendigen Bohrungen für die Verbindungsmittel werden zwar mitunter teilautomatisiert im Werk hergestellt, die einzelnen Verbindungsmittel müssen jedoch händisch und

damit zeitaufwendig und zum Teil mit hohem Kraftaufwand in die Holzquerschnitte eingetrieben werden. Darüber hinaus wird durch die Vielzahl der Bohrungen für die Verbindungsmittel und für die erforderlichen Verbindungsbleche der Querschnitt geschwächt und damit die Tragfähigkeit des Einzelstabes im Nettoquerschnitt des Anschlussbereichs, gegenüber dem ungeschwächten Bruttoquerschnitt, zum Teil erheblich reduziert. Aus oben genannten Gründen können weitspannende Fachwerkkonstruktionen nur selten mit weitspannenden Brettschichtholzträgern wirtschaftlich konkurrieren.

Schwaner (2009, S. 1056) schreibt dazu: „Fachwerkträger (...) im sichtbaren Bereich werden (...) nur unter der Voraussetzung effizienter, ästhetisch ansprechender Knotenverbindungen, einfacher und schneller Herstellung auf der Baustelle, einfacher Bemessung der Verbindungen und besserer Ausnutzung der Holzquerschnitte erfolgreich sein“.

1.1.2 Akzeptanz von Fachwerkträgern in Holzbauweise

➤ ... durch Standardisierung und Reduktion des Einzelpreises aufgrund hoher Stückzahlen

Wirtschaftlich interessant werden aufgelöste Tragsysteme aus Holz dann, wenn die Kosten für Planung, Ausführung, Montage, Instandhaltung, Instandsetzung und Recycling reduziert werden können und sich ein Kostenniveau ähnlich dem von Brettschichtholzbindern einstellt. Eine Reduktion der Kosten kann in erster Linie durch hohe Stückzahlen an standardisierten Systemelementen (Module) erreicht werden. „In den betriebswirtschaftlichen Modellen sinken die Stückkosten typischerweise um 20 % – 30 % bei einer Verdoppelung der kumulierten Ausbringungsmenge“ (digitales bauen GmbH, 2008, S. 16). Weiterhin können Kosten durch die Entwicklung langlebiger Systeme, eine Vereinfachung im Planungsprozess, eine weitgehend automatisierte und industrielle Herstellung der Systemeinzelkomponenten und eine einfache und schnelle Montage ebendieser, minimiert werden.

➤ ... durch Wiederverwendbarkeit standardisierter Elemente ¹

Weitspannende Brettschichtholzvollwandbinder lassen kaum eine Wiederverwendung zu. Zum einen nehmen die Binder beim Austreiben der Verbindungsmittel sichtbaren Schaden. Zum anderen ist eine Zweitnutzung nur dann möglich, wenn für die neue Bauaufgabe eine gleiche Systemspannweite vorliegt. Eine Vergrößerung der Systemspannweiten ist - verständlicherweise - bei Vollwandquerschnitten ohne Weiteres nicht möglich und auch kleinere Spannweiten sind nur durch eine Kürzung der Träger realisierbar. Infolge dessen müssten für neue Bauaufgaben die Bauteilanschlüsse überarbeitet oder neu geplant werden. Auch eine Zwischenlagerung sperriger Vollwandbinder bis zur Wiederverwendbarkeit in einer neuen Bauaufgabe ist kaum möglich, da witterungsgeschützte Lagerstätten zur Verfügung stehen müssten, um dort die Träger bis zu einer Neuverwendung zwischenzulagern.

Standardisierte, zerstörungsfrei demontierbare Systemelemente ermöglichen hingegen leicht eine Mehrfachnutzung. Durch die Flexibilität im Aufbau können unter Verwendung einheitlicher Konstruktionsraster Spannweiten und statische Systeme variiert werden. Die Verwendung ein und desselben Systemelements in unterschiedlich langen aufgelösten Fachwerk-Biegeträgern ist dabei ebenso möglich, wie ein Systemwechsel vom aufgelösten Fachwerk-Biegeträger zum Fachwerk-Rahmen, Fachwerk-Gelenkträger oder Fachwerk-Durchlaufträger, etc. Die Zwischenlagerung ist bei standardisierten

¹ Die Frage der Produkthaftung für Bauteile, die einer Zweit- oder Mehrfachnutzung unterzogen werden, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht thematisiert.

Systemelementen nur bedingt nötig, da sie praktisch unmittelbar nach der Demontage und einer entsprechenden Bauteilkontrolle verpackt und ohne Überarbeitung oder lange Zwischenlagerung zur neuen Baustelle transportiert werden können.

➤ durch Steigerung der Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines Systems kann unter zweierlei Gesichtspunkten beurteilt werden: Zum einen die statische Leistungsfähigkeit und damit die Tragfähigkeit der Einzelkomponenten. Zum anderen aber auch die konstruktive Leistungsfähigkeit, worunter die Möglichkeit einer flexiblen Nutzung der Systemelemente zu verstehen ist. Die Flexibilität kann dabei sowohl in einer Variation der Systemspannweite als auch der Ausbildung verschiedener statischer Systeme - wie Einfeldträger, Mehrfeldträger oder Rahmentragwerke - gesehen werden.

Da in den letzten Jahren der Anteil von Holz und Holzwerkstoffen unter den Baustoffen im Bausektor kontinuierlich gestiegen ist (Wegener; Pähler; Tratzmiller, 2010, S. 11), ist davon auszugehen, dass auch die Kosten für den Werkstoff künftig steigen, sind doch die Holzressourcen weltweit begrenzt. Im Hinblick darauf macht es also auch Sinn, standardisierte Systemelemente zu entwickeln, die nach der Nutzungsdauer des Bauwerks zerstörungsfrei demontiert und für neue Bauprojekte erneut genutzt werden können. Dass dies grundsätzlich möglich ist, zeigen viele Beispiele aus den vergangenen Jahrhunderten, in denen intakte Holzquerschnitte nach der Nutzungsdauer in weiteren Bauwerken wiederverwendet worden sind.

➤ durch Alleinstellungsmerkmale

Mit der Konzentration auf spezielle Nischenbereiche des Bauens lassen sich gewisse Mehrkosten der Systeme gegenüber den aktuellen Systemausführungen legitimieren. Als Beispiel für Nischen sind *fliegende Bauten*, also „...bauliche Anlagen, die geeignet und bestimmt sind, an verschiedenen Orten wiederholt aufgestellt und zerlegt zu werden“ (Musterbauordnung – MBO, 2002, S. 62) zu nennen. Hierzu zählen unter anderem nicht ortsfeste Tribünen oder Festzelte - für die neben einer einfachen Montage auch eine einfache und zerstörungsfreie Demontage erforderlich ist.

Auch Behelfsbauten für Krisensituationen, z. B. Flüchtlingslager fallen unter mögliche Nischenprodukte. So lassen sich die Systemelemente auf ein möglichst geringes Packmaß, z. B. auf das Maß von Europaletten optimieren, dass sie in Containern weltweit verschifft, auf dem Landweg mit Sprintern, Pickups, oder LKW transportiert oder über Krisengebieten aus Flugzeugen abgeworfen werden können. Eine weitere Nische sind beispielsweise geographisch schwer zugängliche Gebiete, wie Gebirgstäler, wo ein Transport großer, sperriger Bauteile kaum möglich ist und damit kleinere Systemelemente erforderlich sind.

➤ durch die Ökologie des Holzbaus

Dass Holz- neben Lehm- und Strohbauten zu den ökologischsten Bauten zu zählen sind, ist unumstritten. Dennoch ist jeder Schritt im Lebenszyklus eine Holzelementes - sei es die Saat des Baumes, die Baumpflege, die Holzernte, der Holztransport, die Holzlagerung, die Holzbearbeitung, die technische Holztrocknung, das Verkleben, der chemische Schutz (Holzschutz / Brandschutz), die Montage des Bauproduktes, das Monitoring des Bauproduktes, die Nutzung, Instandhaltung oder Instandsetzung des Bauproduktes und schließlich die Demontage des Bauproduktes wie auch das Recycling - mit einer notwendigen Energiezufuhr verbunden. Diese Energie wird als graue Energie bezeichnet und kann als CO₂-Äquivalent wiedergegeben werden. Jeder Schritt im Lebenszyklus eines Holzproduktes verursacht folglich CO₂. Zwar bindet das Holzprodukt selbst große Mengen an CO₂, die um ein Vielfaches über der

Menge liegen, die bei der Herstellung verursacht wird. Gleichwohl darf das Holzhaus nicht als dauerhafter CO₂-Speicher missverstanden werden. Wird der Holzanteil nach der Lebenszeit des Gebäudes oder nach der Lebenszeit einzelner Bauwerksteile einer thermischen Verwertung zugeführt, so wird das im Holz gespeicherte CO₂ wieder freigesetzt. Die thermische Verwertung an sich ist zwar CO₂-neutral, denn es wird (abgesehen von Klebstoffen, Farben, Holz- und Brandschutzmitteln, etc.) nur die Menge an CO₂ in die Atmosphäre abgegeben, die der Baum zu Lebzeiten der Atmosphäre entzogen hat, trotzdem wurde über die oben skizzierten Phasen graue Energie zugeführt, die letztlich zum CO₂-Anstieg in der Atmosphäre führt.

Gelingt es langlebige standardisierte Holzprodukte zu entwickeln, die zerstörungsfrei demontiert werden können und im Rahmen einer Mehrfachnutzung immer und immer wieder Verwendung finden, so ist bei einer Wiederverwendung des Holzproduktes der Anteil an grauer Energie vergleichsweise gering und begrenzt sich auf diejenige graue Energie, die im Rahmen des Rückbaus, des Transportes und des Wiederaufbaus in einer neuen Tragstruktur anfällt. Der Anteil grauer Energie, der von der Aussaat des Baumes bis zur Herstellung des Bauproduktes anfällt bleibt hingegen eingespart.

1.2 Aufbau und Methodik der Arbeit

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf insgesamt 4 Themenfeldern:

Themenfeld 1: Materialien und Stand der Technik (Kapitel 2 und Kapitel 3)

Im ersten Themenfeld werden die wesentlichen, für das Verständnis dieser Arbeit notwendigen Materialeigenschaften von Holz und KP vorgestellt. Diese wurden anhand von Literaturrecherchen zusammengestellt und durch eigene Ergebnisse aus mechanischen Untersuchungen an Holz und KP ergänzt. Neben den Ergebnissen der Materialprüfungen werden Ergebnisse aus Langzeitversuchen zum hygroskopischen Verhalten von Holz und KP aufgezeigt. Für Fichtenholz und KP werden alle notwendigen Angaben für eine FE-Simulation aufgeführt. Es werden unterschiedliche Arten von Bauteilanschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln vorgestellt und die Leistungsfähigkeit konventioneller Systeme beschrieben. Daraus wird der Handlungsbedarf für eine Verstärkung des Bauteilanschlusses abgeleitet. Eine Aufführung und Bewertung von Beispielen für Verstärkungen von Bauteilanschlüssen aus verschiedenen Quellen bildet den Abschluss des Themenfeldes.

Themenfeld 2: Längsverbindung von nativem Holz und KP (Kapitel 4)

Der zweite Schwerpunkt thematisiert die Längsklebsverbindung von nativem Holz und KP. Die Arbeit setzt sich sowohl mit der Schäftungsverbindung als auch der Keilzinkenverbindung auseinander. Es werden verschiedene Faktoren vorgestellt, die das Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen beeinflussen. Darüber hinaus werden die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Festigkeitseigenschaften von Keilzinkenverbindungen herausgearbeitet. Außerdem werden die Rechercheergebnisse als auch die Ergebnisse eigener Untersuchungen und eigener Bauteilprüfungen mit numerischen Simulationsergebnissen verglichen. Die Leistungsfähigkeit der Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP wird dabei der Leistungsfähigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und Fichte, Buche und Buche sowie von KP und KP gegenübergestellt. Für die Verklebung von nativem Nadelholz und KP werden

charakteristische Keilzinkenfestigkeiten berechnet. Des Weiteren wird die Dauerhaftigkeit der Klebfuge zwischen Fichte und KP thematisiert. Dazu werden Versuche an zyklisch aufgefuechteten und getrockneten Keilzinkenverbindungen durchgefuehrt und ausgewertet.

Themenfeld 3: Bauteilanschluss mit zylindrischen Verbindungsmitteln im verstärkten Stabende (Kapitel 5)

Der dritte Schwerpunkt konzentriert sich auf den eigentlichen Bauteilanschluss mittels Bolzen und metrischen Schrauben. Zunächst werden verschiedene Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von Lochleibungsanschlüssen vorgestellt. Im Anschluss daran werden Ergebnisse aus kleinmaßstäblichen Prüfungen zum Einsatz zylindrischer Verbindungsmittel in KP mit Durchmessern von $d = 8 \text{ mm}$ bis $d = 60 \text{ mm}$ und Ergebnisse aus Bauteilprüfungen an KP-verstärkten Stäben aufgefuehrt. Abschließend wird ein Bemessungsverfahren für den Bauteilanschluss vorgestellt.

Themenfeld 4: Konstruieren mit verstärkten Einzelstäben (Kapitel 6)

Das vierte Themenfeld beschäftigt sich mit KP-verstärkten Bauteilanschlüssen in Holzkonstruktionen. Zunächst wird die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Bauteilanschlüsse mittels numerischer Simulation und mittels der Johansen-Gleichungen verglichen. Für drei Stabquerschnitte werden Grund- und Erweiterungsmodule in Abhängigkeit geeigneter Konstruktionsraster und Transportmaße abgeleitet. Für diese Stabmodule werden dann praktikable Bemessungstabellen für Fachwerkbinder entwickelt. Darüber hinaus werden Einsatzmöglichkeiten modular aufgebauter Fachwerkbinder in verschiedenen Hallensystemen verdeutlicht. Neben Scher-Lochleibungsanschlüssen werden gleitfeste Anschlüsse KP-verstärkter Stäbe mit vorgespannten Schrauben mit einem Durchmesser von $d = 8 \text{ mm}$ bis $d = 20 \text{ mm}$ vorgestellt und ein Bemessungsmodell für gleitfeste Verbindungen in KP entwickelt. Abschließend wird das individuelle Entwerfen mit verstärkten Knoten aus KP erörtert. Im Vordergrund steht hierbei eine größtmögliche Gestaltungsfreiheit bei der Anordnung von bis zu drei Einzelstäben an einen Knotenpunkt. Es werden Materialparameter für KP mit sternförmig geschichteten Furnierlagen hergeleitet und ein Bemessungsverfahren für Freiformknoten aus KP mit sternförmiger Furnierorientierung vorgestellt.

Anmerkung:

Die Quelle der Datensätze der empirischen Untersuchungen zu den jeweiligen Themenfeldern (Untersuchungen im Rahmen von Forschungsprojekten ², oder weiterführende Untersuchungen) kann jeweils den im Anhang aufgefuehrten Prüfprotokollen entnommen werden. Sie werden im Hauptteil dieser Arbeit - der Übersichtlichkeit wegen - nicht explizit aufgefuehrt.

Aufgrund der Lesbarkeit und ohne Diskriminierungsabsicht wird innerhalb dieser Arbeit auf die Genderformulierung „divers“ verzichtet, jedoch schließen alle im Rahmen dieser Arbeit getätigten Genderformulierungen diese stets mit ein.

² Die Projekte sind im Vorwort, S. V aufgefuehrt.

2 Stand der Technik im Holzbau

2.1 Stabtragwerke

Der Aufbau von Tragsystemen größerer Spannweiten erfolgt in der Regel durch die Addition einzelner Querschnitte, bei Fachwerkträgern sind dies einzelne Stäbe. Dies macht aus zweierlei Hinsicht Sinn:

1) Aufgrund von Produktions- und Transportbedingungen sind Länge, Breite und Höhe von Bauteilen endlich. Erst durch die Addition von einzelnen - in ihren Abmessungen begrenzten - Grundelementen entfallen die produktionsbedingten wie auch wirtschaftlichen Beschränkungen.

2) Bei einem auf Biegung beanspruchten Bauteil sind die Belastung im Querschnitt und über die Querschnittslänge unterschiedlich groß. Unter einer Gleichlast sind die Biegebeanspruchungen in Feldmitte am größten, während sie an den Trägerenden 0 betragen. Im Gegensatz dazu sind die Schubbeanspruchungen in Feldmitte 0 und an den Rändern maximal. Verglichen mit einem *Vollquerschnitt* lassen sich mit aufgelösten Querschnitten Material und damit Ressourcen, Gewicht sowie Kosten einsparen.

2.2 Stabanschlüsse

Mit der Addition einzelner Stäbe innerhalb eines Stabtragwerkes stellt sich die Frage nach der Art der Stabverbindung. Im Stahlbau sind sowohl formschlüssige Verbindungen (wie z. B. Bolzenverbindungen, Schraubverbindungen) als auch kraftschlüssige Verbindungen (wie z. B. Nietverbindungen, Klemmverbindungen mit vorgespannten Schrauben) und stoffschlüssige Verbindungsformen (z. B. Lötverbindungen, Schweißverbindungen, Klebverbindungen) möglich.

Im konstruktiven Holzbau kommen bei hochbeanspruchten Bauteilen in erster Linie formschlüssige Verbindungen (geschlitzt, gedübelt, gezinkt) zum Einsatz. Darüber hinaus sind auch kraftschlüssige Verbindungen (z. B. eingeklebte Gewindestäbe) möglich. Eingeklebte Gewindestangen oder eingeklebte Steckmetalle werden in Kapitel 2.2.2 kurz vorgestellt, jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht näher thematisiert.

Bei einem Druckanschluss kann die Übertragung der Stabkraft von einem auf ein weiteres Stabelement durch unmittelbaren Kontakt der Querschnittsflächen erfolgen (Abbildung 1 a)). Bei einem Zuganschluss muss die Stabkraft über zusätzliche konstruktive Elemente aus dem Stab ausgeleitet werden, um sie anschließend in den benachbarten Stab wieder einleiten zu können. Im Holzbau wird dies in der Regel durch sogenannte Zangenanschlüsse (vgl. Abbildung 1 c) - d)) oder Anschlüsse mit Stahlblechen realisiert.

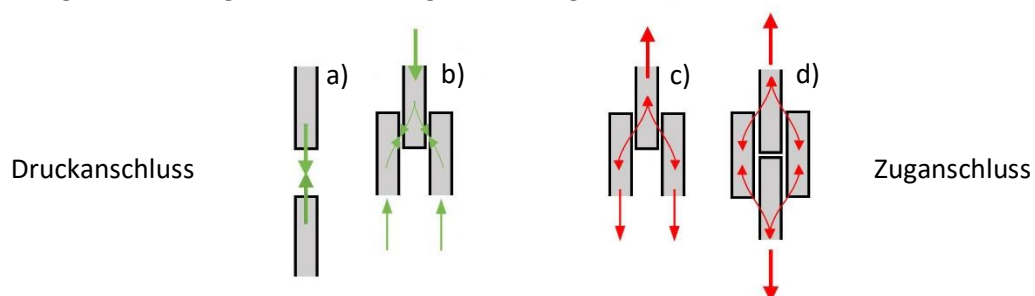


Abbildung 1: a) Stirnholzkontakt; b) Druck-Zange; c) Zug-Zange; d) Zug-Lasche

Die Verbindungsarten im Holzbau lassen sich in zwei Hauptverbindungsarten, die *zimmermannsmäßigen* Verbindungen und die *ingenieurmäßigen* Verbindungen unterscheiden:

Bauteilanschluss mit zimmermannsmäßigen Verbindungen

Zimmermannsmäßige Verbindungen sind vorwiegend als Holz-Holz-Verbindungen ausgeführt. Die Kraftübertragung erfolgt durch Flächenkontakt der Holzquerschnitte und durch Formschluss, hierbei können die Verbindungen durch Schrauben, Nägel und Bolzen gesichert werden.

Bauteilanschluss mit ingenieurmäßigen Verbindungen

Bei ingenieurmäßigen Verbindungen werden vorwiegend stiftförmige Verbindungsmittel, wie Stabdübel, Bolzen, Passbolzen, Schrauben, Nägel, Klammern, Gewindestangen, Stahlbleche, Streckmetalle u. v. m. zum unmittelbaren Kraftabtrag eingesetzt. Die Stabkräfte werden dabei voll auf die jeweiligen Verbindungsmittel übertragen, die wiederum die Kräfte in weitere Stäbe oder in das Auflager einleiten.

2.2.1 Bauteilanschluss mit stiftförmigen Verbindungsmitteln

Die nachfolgenden Beispiele ³ stellen die wesentlichen Verbindungsarten mit stiftförmigen Verbindungsmitteln für hochbelastete Stabtragwerke dar. Die Bemessung der jeweiligen Anschlüsse kann über die Bemessungsgleichungen nach Johansen (1949) erfolgen.

Stahlblech-Stabdübel-Anschluss (BSB-Knotenverbindung)



Abbildung 2: Stahlblech-Stabdübel-Anschluss

Bei Stahlblech-Stabdübel-Anschlüssen (vgl. Abbildung 2) werden Holzquerschnitte über ein oder mehrere Knotenbleche miteinander verbunden. Die Knotenbleche werden zunächst in die vorgeschlitzten Holzquerschnitte eingeführt. Der Verbund erfolgt dann über Stabdübel, die formschlüssig in das Holz und die Bleche eingetrieben werden. In der Regel werden Holz und Stahlblech vorgebohrt. Darüber hinaus kommen aber auch selbstschneidende Stabdübel zum Einsatz.

Die BSB-Verbindung wird im Zulassungsbescheid (Z-9.1-208, 1988) geregelt. Der Bauteilverbund ist nur mit hohem Aufwand und mit einer Schädigung der Verbindung lösbar.

³ Anmerkung: Die Aufzählung ist nicht abschließend.

Greim Stahlblech-Holz-Verbindung / Paslode Stahlblech-Holz-Verbindung

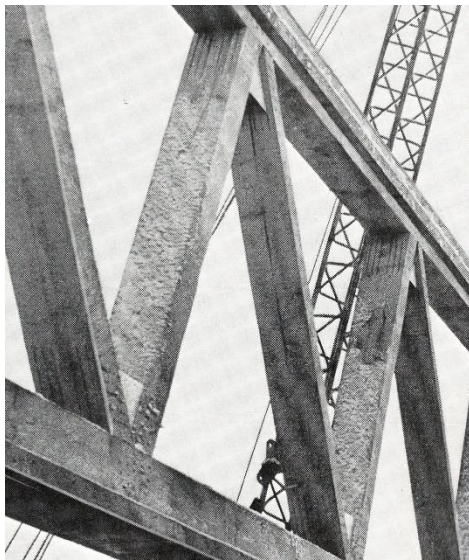
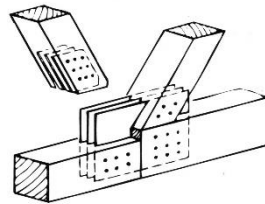


Abbildung 3: Greimbau-Anschluss



Bei der Greim-Bauweise (vgl. Abbildung 3) werden anstatt Stabdübel Nägel durch das Holz und durch eine Vielzahl an nicht vorgebohrten, verzinkten Metallblechen mit einer Stärke von 1,0 – 1,75 mm geschlagen. Die Greim-Verbindung kann in Brettschichtholz (BS-Holz) und Vollholz eingesetzt werden. (Colling, 2008, S. 199)

Die Verbindung wird im Zulassungsbescheid (Z-9.1-166, 2007) vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) geregelt. Die Verbindung ist nicht lösbar.

Bei der Paslode Stahlblech-Holz Nagelverbindung erfolgt das Einbringen der Nägel maschinell, darüber hinaus ist die Verwendung von Blechen mit einer Stärke von 2 - 3 mm möglich (Colling, 2008, S. 199). Die Verbindung wird im Zulassungsbescheid (Z-9.1-212, 1990) vom DIBt geregelt.

Anschluss mit Nagelplatten



Abbildung 4: Anschluss mit Nagelplatten

Nagelplatten sind Verbindungsmittel, bei denen aus 1,0 mm - 2,0 mm starken Stahl- oder Edelstahlblechen Nagelspitzen von 8,0 mm - 21,0 mm Länge ausgestanzt und rechtwinklig zur Blechebene, aus ebendieser, gedrückt werden (Hartmann et al., 2017, S. 9). Nagelbleche werden mit Spezialwerkzeugen auf die zu verbindenden Holzquerschnitte gepresst (vgl. Abbildung 4).

Verbindungen mit Nagelplatten ermöglichen äußerst wirtschaftliche Konstruktionen (Colling, 2008, S. 198). Im Gegensatz zu anderen Verbindungsmitteln treten sie – da außenliegend – deutlich optisch in Erscheinung und eignen sich daher in erster Linie für nichteinsehbare Holzkonstruktionen, wie beispielsweise Supermarktdächer. Nagelbleche stellen, da sie außen am Träger anliegen, eine deutliche Schwachstelle im Brandfall dar und müssen brandschutztechnisch geschützt werden. Die Verbindung ist in DIN EN 1995-1 (2010, S. 84) geregelt. Darüber hinaus sind verschiedene Zulassungsbescheide der Hersteller Mitek und Wolf verfügbar. Die Verbindung ist nicht lösbar.

Anschluss Multikrallendübel (MKD)

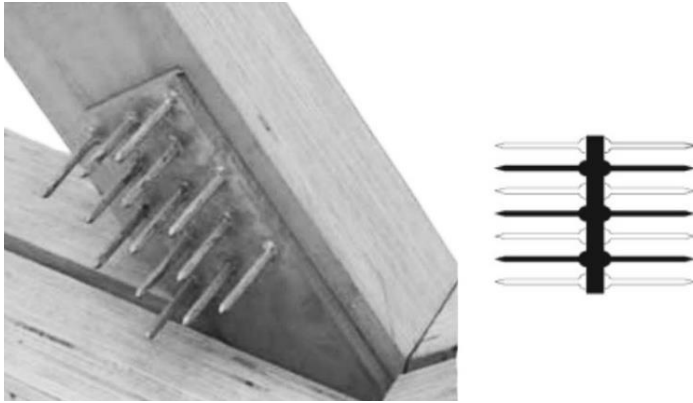


Abbildung 5: Anschluss mit Multikrallendübel (MKD)

Der Multikrallendübel (vgl. Abbildung 5) ist eine zweiseitige stählerne Nagelplatte. Die Grundplatte hat eine Stärke von 10 mm und ist in Ihren Abmessungen variabel. Auf ihr sind beidseitig 50 mm lange Stahlstifte mit einem Querschnitt von 3 x 4 mm aufgeschweißt. Aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit eignet sich der MKD für den Einsatz in hochbeanspruchten Stabpaaren. (Colling, 2008, S. 200)

Wie Nagelbleche werden Multikrallendübel mit Spezialwerkzeugen in die zu verbindenden Holzquerschnitte gepresst. Im Gegensatz zu Nagelblechen liegt der MKD jedoch verdeckt im Inneren des Stabpaares. (Colling, 2008, S. 200)

Optional kann er durch Fräsen vollständig im Holzquerschnitt eingelassen werden. Der MKD kann in BS-Holz, Vollholz oder Furnierschichtholz eingesetzt werden. Die Verbindung wurde im Zulassungsbescheid (Z-9.1-193, 2004) vom DIBt geregelt. Die Verbindung ist nicht lösbar.

2.2.2 Bauteilanschluss mit eingeklebten Verbindungsmitteln

Mit eingeklebten Verbindungsmitteln lassen sich die Vorzüge starrer und duktiler Verbindungen kombinieren. Zum Einsatz kommen Stahlstangen, Bewehrungsseisen oder Gewindestangen sowie Lochbleche.

Anschluss mit eingeklebten Lochblechen

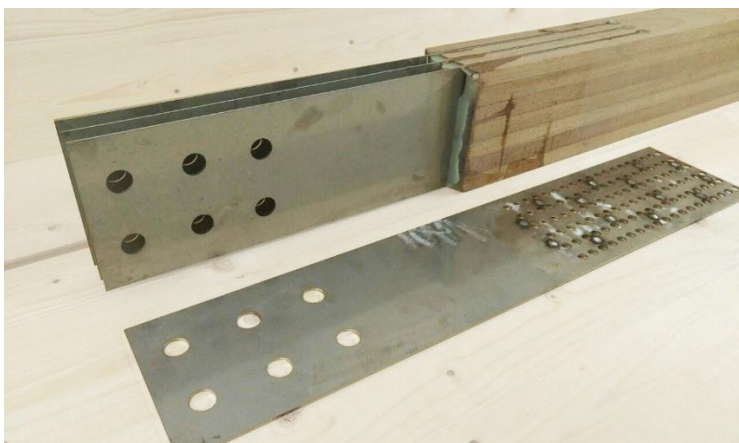


Abbildung 6: Anschluss mit eingeklebten Lochblechen

Um Lochbleche (vgl. Abbildung 6) in die Holzquerschnitte einzubringen, müssen diese geschlitzt werden. Wie bei Stahlblech-Stabdübel-Verbindungen oder Greimverbindungen wird auch hier der Querschnitt um das Maß der Lochbleche geschwächt. Für die Kraftübertragung auf das Lochblech werden jedoch keine stiftförmigen Verbindungsmittel benötigt.

Die Querschnittsschwächung bleibt somit begrenzt und es können dadurch vergleichsweise hohe Tragfähigkeiten der Stäbe angesetzt werden. Der Verbund zwischen Lochblechen und Holz erfolgt vorwiegend über Epoxidharzklebstoff.

Anschluss mit eingeklebten Stahlstäben

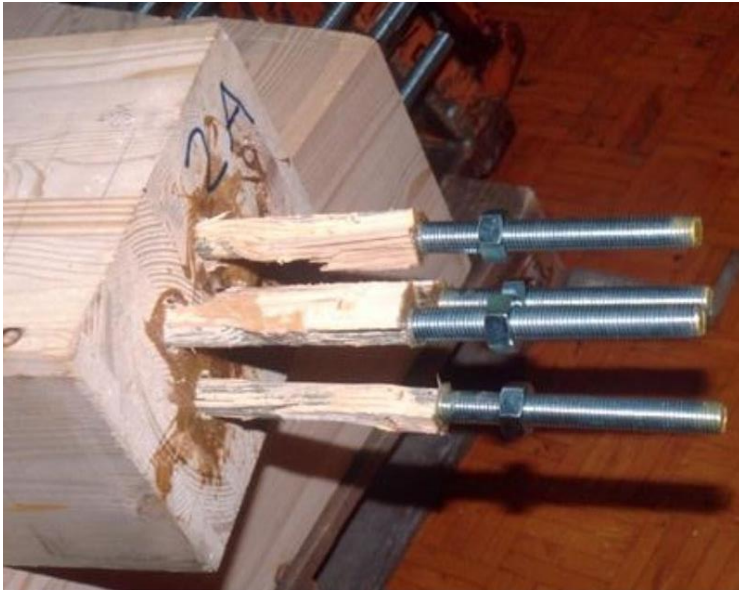


Abbildung 7: Anschluss mit eingeklebten Stahlstäben

Bei dieser Verbindungsart (vgl. Abbildung 7) werden Stahlstangen entlang der Stabachse in zunächst vorgebohrte Löcher eingeführt und mit Epoxidharzklebstoff oder PUR-Klebstoff dauerhaft mit dem Holzquerschnitt verklebt (Steiger, 2012). Durch die Lage im Inneren des Holzquerschnitts sind die Verbindungsmittel von außen nicht sichtbar und zudem vor Korrosion und im Brandfall vor thermischer Einwirkung geschützt. Gewindestäbe können sowohl in Vollholz, BS-Holz, BSP-Holz oder Furnierschichtholz eingeklebt werden.

Mit eingeklebten Gewindestangen wird der Stabquerschnitt geringfügig geschwächt, sodass fast der volle Stabquerschnitt zur Kraftaufnahme angesetzt werden kann. „Verbindungen mit eingeklebten profilierten Stahlstäben zählen zu den leistungsfähigsten Verbindungsarten“ (Steiger, 2012). Verbindungen mit faserparallel in BS-Holz eingeklebten Stahlstäben sind im Zulassungsbescheid (Z-9.1-791, 2016) vom DIBt geregelt.

Gewinde – Stangen – Anker (GSA)



Abbildung 8: GSA-Systemanschluss

Beim Gewinde – Stangen – Anker (vgl. Abbildung 8) handelt es sich um einen in der Schweiz entwickelten und optimierten sowie patentierten Systemanschluss, der die Möglichkeit bietet, sowohl biegesteife als auch gelenkige Anschlüsse, auszubilden. Die Stabkräfte werden über im Stab unsichtbar eingeklebte Gewindestangen entweder direkt von einem auf einen weiteren Holzquerschnitt, oder auf weitere Stahlelemente übertragen. Dadurch kann ein einfacher, schneller und effizienter Montagestoß auf der Baustelle durchgeführt werden.

Mit GSA-Anschlüsse lassen sich lösbare Anschlüsse realisieren, wobei die im Holz eingeklebten Metalle selbst jedoch nicht lösbar sind.

Nachteil eingeklebter Verbindungsmittel

Bauteilanschlüsse mit stiftförmigen Verbindungsmitteln sind bedingt reversibel. Da Stabdübel und Passbolzen mit hohem Kraftaufwand in die Querschnitte eingetrieben werden, muss das Austreiben der Verbindungsmittel ebenfalls mit hohem Kraftaufwand erfolgen. In der Regel werden jedoch beim Austreiben der Verbindungsmittel die Holzquerschnitte im Bereich der Bohrlöcher geschädigt, sodass eine erneute Nutzung nur eingeschränkt möglich ist. Bei Verbindungen mit eingeklebten Verbindungsmitteln können die Verbindungsmittel selbst nicht zerstörungsfrei vom Holz und Klebstoff getrennt werden. Eine erneute Nutzung der Bauteile für dieselbe konstruktive Aufgabe ist jedoch in Einzelfällen möglich.

2.3 Probleme und Handlungsbedarf

Reduktion der Querschnittsfläche

Allen Verbindungsarten des konstruktiven Holzbaus ist gemein, dass durch die Ausführung der Verbindung der Stab geschwächt wird. Die Stabschwächung wird durch eine Querschnittsreduktion im Bereich der Bauteilverbindung - i. d. R. an den Stabenden - hervorgerufen, die je nach Verbindungsart eine Schwächung um bis zu 50 % betragen kann (Abbildung 9, links). Selbst bei modernen ingenieurmäßigen Verbindungsarten mit Stahlblech-Stabdübelverbindungen (Abbildung 9, rechts) wird - durch das Schlitten des Holzquerschnitts zwecks Aufnahme der Verbindungsbleche und durch die Bohrungen für die Aufnahme der Stabdübel - der Querschnitt reduziert. Eine Reduktion des Querschnitts führt zu einer Erhöhung der Spannungen. Für die Berechnung der Tragfähigkeit des Stabes kann demnach nicht die Bruttoquerschnittsfläche des ungeschwächten Stabes, sondern nur die Nettoquerschnittsfläche (A_{netto} bzw. $A_{net,t}$) des geschwächten Stabendes herangezogen werden (vgl. DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 118).

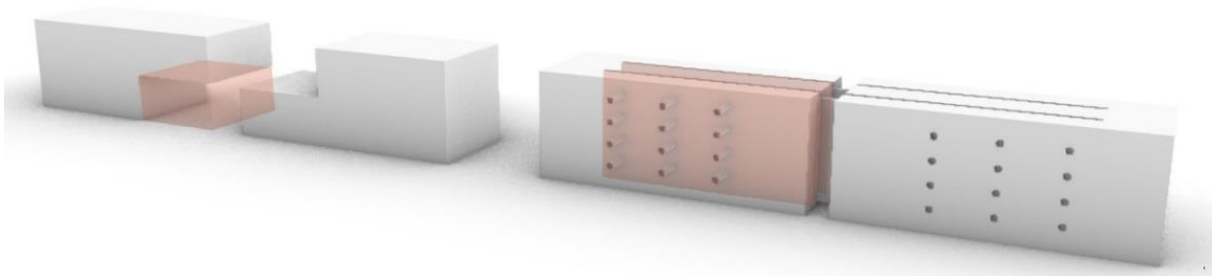


Abbildung 9: Normalkraftstöße und Querschnittsverlust in rot. Links gerades Blatt, rechts: Stabdübel-Stahlblech-Anschluss

Unter der Annahme gleicher Festigkeitseigenschaften über den gesamten Stabquerschnitt sinkt bei einer Zugbeanspruchung die Tragfähigkeit des Stabes um den Faktor $1 - A_{netto}/A_{brutto}$.

Die Gesamttragfähigkeit des Restquerschnitts beträgt dann noch:

$$F_{R,d,netto} = F_{R,d,brutto} \times \frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$$

bzw.

$$F_{R,d,netto} = F_{R,d,brutto} \times \alpha$$

A_{brutto}	Bruttoquerschnittsfläche ohne Querschnittsschwächung durch die Verbindungsmittel
A_{netto}	Nettoquerschnittsfläche unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung durch die Verbindungsmittel
$F_{R,d,netto}$	Bemessungswert der Stabtragfähigkeit unter Berücksichtigung der Querschnittsschwächung
$F_{R,d,brutto}$	Bemessungswert der Stabtragfähigkeit ohne Querschnittsschwächung
a	Verschwächungsgrad = $\frac{A_{netto}}{A_{brutto}}$

Pauschal können Querschnittsschwächungen durch stiftförmige Verbindungsmittel nach Tabelle 1 angesetzt werden:

Tabelle 1: Faustwerte für Querschnittsschwächungen bei zugbeanspruchten Bauteilen

	Nägels und Schrauben			Stabdübel	Dübel besonderer Bauart	Einseitiger Versatz
	vorgebohrt	nicht vorgebohrt				
		$d \leq 0,6 \text{ mm}$	$d > 0,6 \text{ mm}$			
ΔA	$\approx 0,1 A_{\text{brutto}}$	-	$\approx 0,1 A_{\text{brutto}}$	$\approx 0,15 A_{\text{brutto}}$	$\approx 0,25 A_{\text{brutto}}$	$\approx 0,25 A_{\text{brutto}}$

Insbesondere bei hochbeanspruchten Stabquerschnitten reduziert sich durch die Vielzahl der zum Kraftabtrag notwendigen Verbindungsmittel die Querschnittsfläche stärker als in Tabelle 1 angegeben.

Für den mittig beanspruchten Zugstab ist nachzuweisen, dass:

$$\frac{N_d}{A_{netto}} \leq k_h \times f_{t,0,d}$$

N_d	Bemessungswert der Normalkraft	A_{netto}	Nettoquerschnittsfläche
k_h	Höhenfaktor	$f_{t,0,d}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit parallel der Faser

Spannungsspitzen im Holzquerschnitt

In Abbildung 10, S. 13 ist der Anschluss zweier Holzstäbe an ein mittiges Stahlblech dargestellt. Für diesen Anschluss sind in Abbildung 10 2), 3) und 4) die Spannungsverteilungen unter einer Zugbeanspruchung um das Verbindungsmittel herum qualitativ dargestellt, dabei steht rot für maximale Zugspannungen und blau für maximale Druckspannungen. Für die Simulation wird ein idealsprödes und damit ideal linear-elastisches Materialverhalten für den Werkstoff zugrunde gelegt. Dieses Verhalten bildet das tatsächliche Materialverhalten gut ab, da bei Holz unter einer Zugbeanspruchung „... bis zum Bruch keine nennenswerten plastischen Verformungen auftreten. Der Bruch spröder Werkstoffe erfolgt direkt nach dem elastischen Stadium der Formänderung. Ein duktiler Werkstoff dagegen zeigt vor dem Bruch plastische Verformungen, durch die Spannungsspitzen abgebaut werden können“ (Ehlbeck & Eberhart, 1989, S. 102).

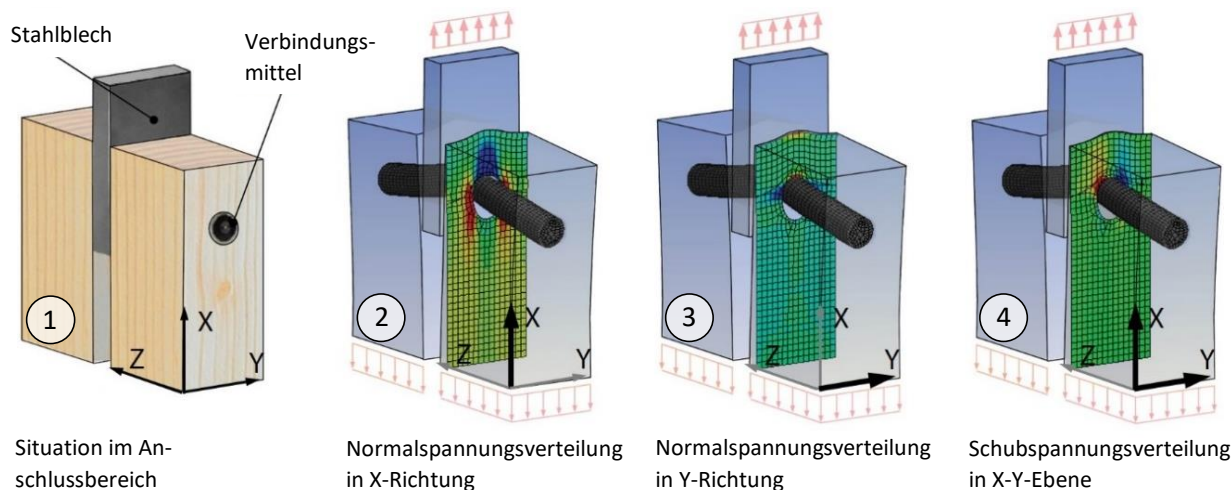


Abbildung 10: Spannungsverteilung im Bereich des Verbindungsmittels. Rot = max / Zugkraft, blau = min / Druckkraft

In Abbildung 10 2) ,3) ,4) zeigt sich, dass um das Verbindungsmittel herum die Spannungen im Holzquerschnitt nicht homogen verteilt sind, sondern sich in unmittelbarer Umgebung des Verbindungsmittels konzentrieren.

Unter einer Zugbeanspruchung muss die Stabkraft als Zugkraft zunächst um das Verbindungsmittel herumgeleitet werden, um dann von Richtung des Stabendes aus - als Druckkraft - auf das Verbindungsmittel übertragen zu werden. Durch die Bohrung für das Verbindungsmittel steht eine geringere Querschnittsfläche im Bereich des Anschlusses für die Kraftabtragung zur Verfügung, infolge dessen steigen die Zugspannungen im Nettoquerschnitt in X-Richtung an (vgl. Abbildung 10, 2)). Der Spannungsanstieg hängt stark vom Verhältnis der Bohrung zur effektiven Querschnittsfläche (Lastezugsfläche) ab. Je größer die Bohrung im Verhältnis zur effektiven Querschnittsfläche ist, desto größer ist der Spannungsanstieg. Durch die Kerbwirkung der Bohrung erreicht die Spannung nahe des Verbindungsmittels ihren Maximalwert. Übersteigt die Spannung die Längszugfestigkeit, so kommt es zum Riss im Nettoquerschnitt und der Anschluss versagt.

Im Kontaktbereich zwischen der Mantelfläche des Verbindungsmittels und der Lochleibung des Holzquerschnitts kommt es in der Druckzone zu einer Druckspannungsspitze in X-Richtung (vgl. Abbildung 10, 2)). Die Druckspannungsspitze hängt stark vom Verhältnis des Verbindungsmitteldurchmessers zur effektiven Querschnittsfläche (Lastezugsfläche) ab. Je kleiner das Verbindungsmittel im Verhältnis zur effektiven Querschnittsfläche ist, desto höher sind die Druckspannungen in der Druckzone der Lochleibung. Übersteigen die Spannungen die Druckfestigkeit des Holzes so kommt es zum Lochleibungsversagen.

In der Druckzone der Lochleibung bildet sich im Bereich vor dem Verbindungsmittel (Druckzone), aufgrund der Kraftumleitung von Zug im Nettoquerschnitt auf Druck im Vorholz, eine Zugspannungsspitze quer zur Kraftrichtung aus (vgl. Abbildung 10, 3)).

Auch diese ist stark vom Verhältnis des Verbindungsmitteldurchmessers zur effektiven Querschnittsfläche abhängig. Übersteigt die Spannung quer zur Kraftrichtung die Querkzugfestigkeit, dann kommt es zum Aufspalten des Vorholzes und zum Versagen des Anschlusses.

Der Kraftumlenkung geschuldet wird der Vorholzbereich auf Scheren beansprucht (vgl. Abbildung 10, 4)). Übersteigt die Spannung die Scherfestigkeit, so kommt es zum Blockscherversagen.

Eine weiterführende Beschreibungen des Spannungszustandes erfolgt in Kap. 5.2, S. 136 ff.

Der Wirkungsgrad eines Anschlusses mit stiftförmigen Verbindungsmitteln - unter Berücksichtigung von Querschnittsverlusten infolge der Verbindungsmittel und unter Berücksichtigung von Spannungsspitzen durch die Kerbwirkung der Löcher - liegt bei etwa 40 % bis 60 % (Ehlbeck & Werner, 1994, S. 1.1).

Da für die Bemessung eines Zugstabes der Nettoquerschnitt im Anschlussbereich maßgebend ist, ist folglich der Stab, bei gleichbleibenden Querschnittsabmessungen in Bereichen außerhalb der Bauteilanschlüsse überdimensioniert. Grundsätzlich wäre es also denkbar, den Stab im ungeschwächten Bereich auf das Maß der Nettoquerschnittsfläche des Anschlussbereiches zu verjüngen, sodass für jeden Bereich des Stabes die gleiche reelle Querschnittsfläche zum Lastabtrag zur Verfügung stünde und der Stab entlang seiner Stabachse an jeder Stelle zu 100 % ausgenutzt werden kann. Damit stünden effiziente und zugleich nachhaltige Querschnitte zur Verfügung.



Abbildung 11: Anschlussblech-Stabanker-Zugstab-System

Im Stahlbau werden die Zugstäbe von Systemanschlüssen durch Stabanker (Gabelköpfe) aufgeweitet, um den Querschnittsverlust durch die Öffnung für den Anschlussbolzen zu kompensieren (vgl. Abbildung 11). Der Nachweis der Systemzugstange erfolgt ausschließlich über den Querschnitt des ungeschwächten Stahlstabes und es bedarf keiner separaten Bemessung des Gabelkopfes.

Folgerung

Die Entwicklung von Systemelementen im Holzbau, bei denen der Nachweis rein über die Bruttoquerschnittsfläche und ohne den Nachweis des Anschlussbereiches erfolgen kann, würde die statische Nachweisführung für Holztragwerke immens erleichtern und deutliche Anreize für das Bauen mit Holz setzen.

2.3.1 Wirkungsgrad von auf Zug beanspruchten Systemen – Beispiel

Für einen Zangenanschluss zweier Stäbe der Abmessungen $b = 60 \text{ mm}$ und $h = 120 \text{ mm}$ der Festigkeitsklasse C24 an ein mittiges Stahlblech der Stärke 5 mm wird im nachfolgenden Beispiel der Wirkungsgrad $n = R_{d, \text{Anschluss}} / R_{d, \text{Bruttoquerschnitt}}$ bestimmt.

Die Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts berechnet sich für den Standardfall mit:

$$F_{t,0,Rd} = A_{brutto} \times f_{t,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\lambda_M} \times k_h$$

$$F_{t,0,Rd} = 2 \times 60 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \frac{0,8}{1,3} \times 1,046$$

$$F_{t,0,Rd} = 129,8 \text{ kN}$$

Die Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses wird für die beiden nachfolgenden Varianten bestimmt:

- 1) Anschluss mit Stabdübeln mit $d = 10 \text{ mm}$, S355
- 2) Anschluss mit Passbolzen mit $d = 12 \text{ mm}$, 8.8

Die für die beiden Varianten einzuhaltenden Mindestrandabstände und Mindestabstände der Verbindungsmittel (VM) untereinander sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 2: Mindestabstände nach DIN EN 1995-1-1 für Stabdübel- und Passbolzenanschluss

Mindestabstände	Stabdübelanschluss	Passbolzenanschluss
a_3 (Randabstand Stirnholz)	$7 \times d$ (min 80) = 80 mm	$7 \times d$ (min 80) = 84 mm
a_4 (Randabstand Seitenholz)	$3 \times d = 30 \text{ mm}$	$3 \times d = 36 \text{ mm}$
a_1 (Abstand VM in Reihe)	$3 \times d = 30 \text{ mm}$	$3 \times d = 36 \text{ mm}$
a_2 (Abstand VM hintereinander)	$5 \times d = 50 \text{ mm}$	$5 \times d = 60 \text{ mm}$

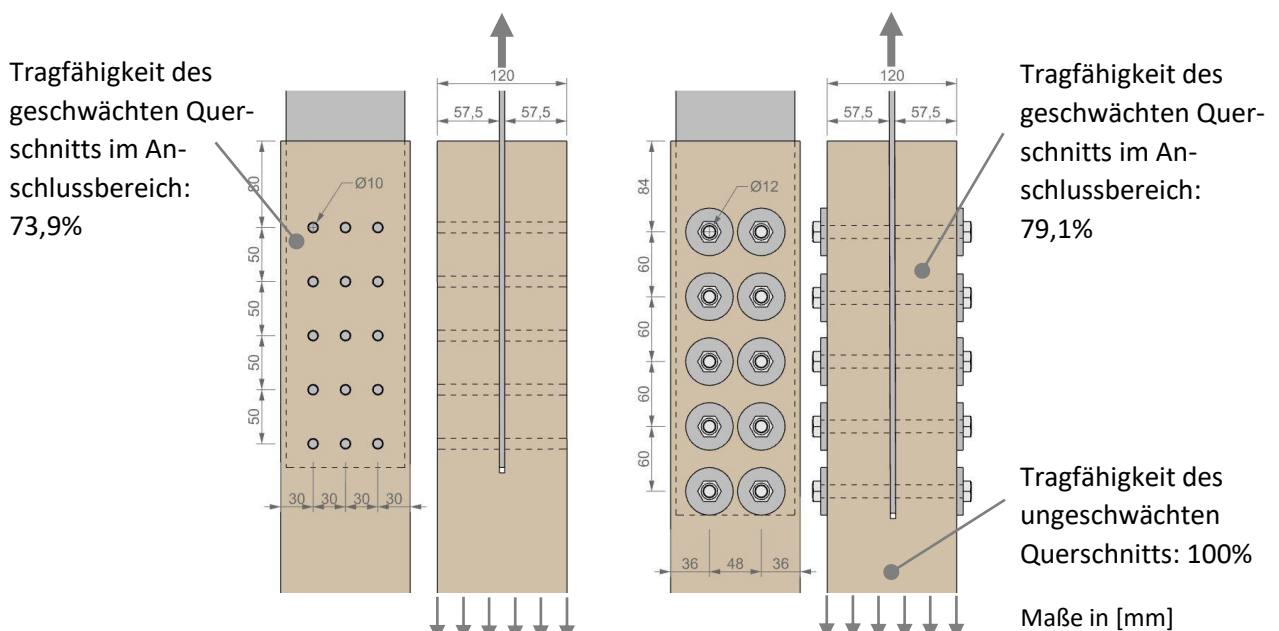


Abbildung 12: Anschlussausführung mit Stabdübeln (links) und Passbolzen (rechts)

Im Beispiel 1) sind 5 Reihen à 3 Stabdübel und in Beispiel 2) sind 5 Reihen à 2 Passbolzen für den Lastabtrag notwendig. Hierbei reduziert sich die Bruttoquerschnittsfläche mit $3 \times 10 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$ um 25 % und im Beispiel 2) mit $2 \times 12 \text{ mm} = 24 \text{ mm}$ um 20 %.

Werden die Stabquerschnitte zur Aufnahme der Stahlbleche geschlitzt - so wie in Abbildung 12, S. 15 dargestellt - , reduziert sich der Bruttoquerschnitt um die Stärke der Stahlbleche und der Wirkungsgrad verringert sich zusätzlich. Im Beispiel 1) liegt der Wirkungsgrad dann bei 73,9 % und im Beispiel 2) bei 79,1 %.

Anmerkung:

Die entsprechenden Nachweise für die unter Abbildung 12 dargestellten Anschlüsse können dem Anhang 2.1, S. A-5 ff. entnommen werden.

2.3.2 Möglichkeiten der Verstärkung

2.3.2.1 Lokale Steigerung der Querschnittsfläche durch Aufweitung des Querschnitts

Das Beispiel der Knotengestaltung des Tamedia Hauptquartiers in Zürich zeigt, dass die Aufweitung des Anschlussbereiches prinzipiell auch im Holzbau möglich ist. Hier wird der Anschlussbereich ebenfalls um das zentrale Verbindungselement geometrisch aufgeweitet, sodass der Querschnittsverlust - zumindest in Teilen - kompensiert werden kann. Zusätzlich befindet sich - verdeckt im Knoteninneren - eine Buchensperrholzplatte, die den Knoten zusätzlich verstärkt.

Die geometrische Aufweitung der Knoten des Tamedia Hauptquartiers ist jedoch mehr als eine Gestaltungsabsicht zu verstehen als eine wirtschaftlich sinnvolle und technisch praktikable Lösung. Während im Stahlbau die geometrische Stabaufweitung additiv erfolgt, und damit kein Material verloren geht, kann die geometrische Stabaufweitung im Holzbau nur durch einen destruktiven Bearbeitungsprozess erzielt werden, bei dem überflüssiges Material entfernt wird (Fräsbearbeitung) und damit verloren geht (s. Abbildung 13).

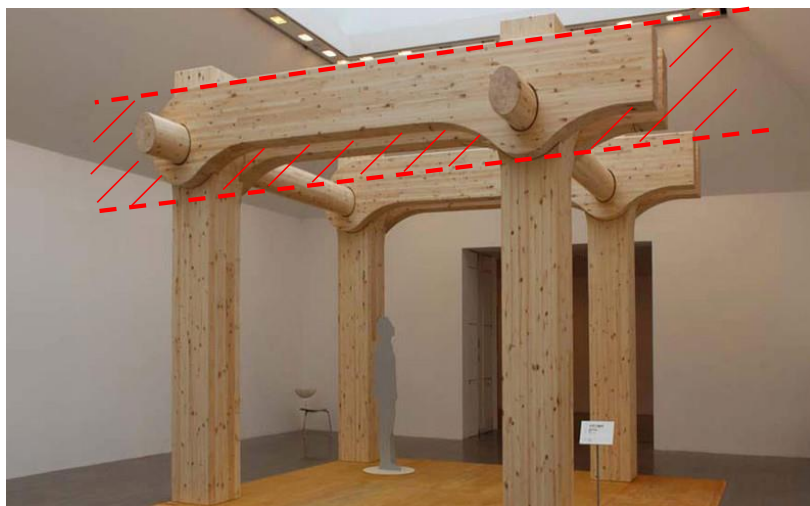


Abbildung 13: Tamedia Hauptquartier, Zürich, Konstruktionsmodell nach Shigeru Ban

2.3.2.2 Lokale Steigerung der Festigkeit durch Addition hochfester Werkstoffe

Eine weitere Möglichkeit zur Kompensation des Querschnittsverlustes neben einer geometrischen Aufweitung der Stabenden besteht darin, die Festigkeit der Stabbereiche mit reduziertem Querschnitt lokal zu steigern. Obwohl der Querschnitt im Anschlussbereich geschwächt bleibt, kann die Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts angesetzt werden, sofern die Festigkeit des Anschlussbereiches mit reduziertem Querschnitt ausreichend groß ist. In Abbildung 14 ist ein Stabdübel-Stahlblech-Anschluss skizziert. Nach Tabelle 1, S. 12 kann dann eine pauschale Querschnittsschwächung durch den Einsatz von Stabdübeln von 15 % angesetzt werden. Das Schlitzten des Holzquerschnitts zur Aufnahme der Stahlbleche schwächt den Querschnitt weiterhin pauschal um 10 %, was eine Gesamtschwächung von 23,5 % darstellt.

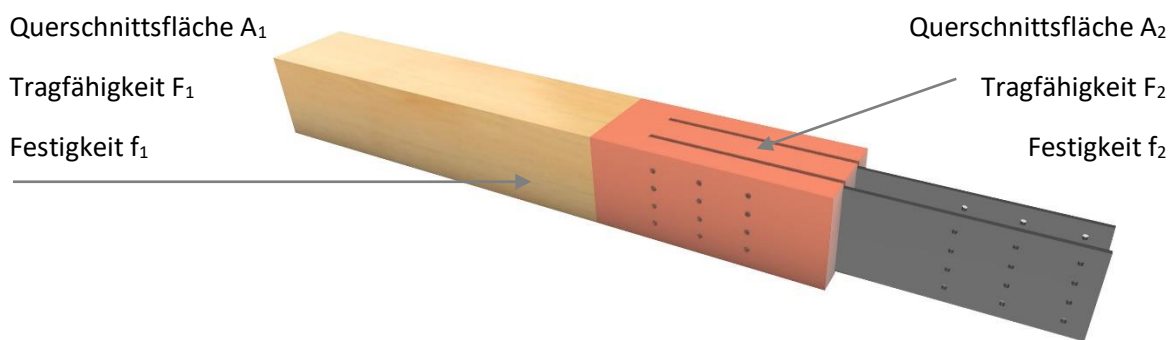


Abbildung 14: Schema Addition hochfester Werkstoffe am Stabende

Um die Tragfähigkeit F_1 des ungeschwächten Querschnitts auch für die Tragfähigkeit F_2 im Anschlussbereich ansetzen zu können, muss die Festigkeit f_2 im Anschlussbereich gegenüber der Festigkeit f_1 des ungeschwächten Querschnitts wie folgt gesteigert werden:

$$F_1 = A_1 \times f_1$$

$$F_2 = 0,765 A_1 \times f_2$$

$$\text{wenn: } F_1 = F_2$$

$$\text{dann: } f_2 = 1,31 \times f_1$$

Der Einfluss von Spannungsspitzen wird hier jedoch nicht berücksichtigt!

2.3.3 Verstärkungsarten des Bauteilanschlusses

Nachfolgend werden bekannte Verstärkungsmöglichkeiten für den Bauteilanschluss vorgestellt:

2.3.3.1 Verstärkungen durch Optimierung der Verbindungsmittel

Lokale Verstärkung der Holzanschlussbereiche wurden bereits ab den 1920-er Jahren erforscht. Trayer (1932) untersuchte unter anderem den Einfluss des Durchmessers, der Stahlqualität und der Bolzenbeschaffenheit. Grundsätzlich steigt die Leistungsfähigkeit des Anschlussbereiches mit fallendem Durchmesser und zunehmender Stahlqualität des Verbindungsmittels (vgl. Kap. 5.4, S. 144 ff.).

2.3.3.2 Verstärkungen mittels seitlich aufgeklebter Holzwerkstoffplatten

Ehlbeck & Werner (1994) untersuchten den Einfluss seitlich aufgeleimter Holzwerkstoffplatten auf die Lochleibungsfestigkeit an Fichtenholzquerschnitten. Zum Einsatz kamen Verbindungsmittel mit einem Durchmesser von 8 mm, 16 mm und 24 mm. Durch das seitliche Aufkleben der Holzwerkstoffplatten wird das Aufspalten des Holzes quer zur Belastungsrichtung behindert und die Stauchung der Lochleibung in der Druckzone beeinflusst. Im Vergleich zu nicht verstärkten Querschnitten stellte sich mit den verstärkten Prüfkörpern eine ca. 10 % höhere Lochleibungsfestigkeit ein (vgl. Ehlbeck & Werner, 1994, S. 4-6). Die Art des Holzwerkstoffes sowie dessen Abmessungen, wurden nicht näher genannt.

2.3.3.3 Verstärkungen mittels mittig eingeklebter Bau-Buchenfurniersperrholzplatten

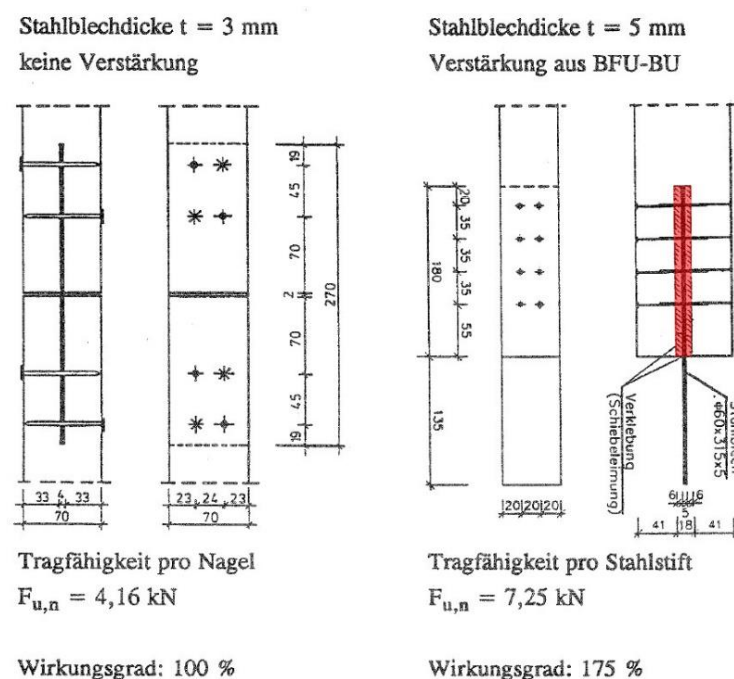


Abbildung 15: Links: konventioneller Anschluss; rechts: verstärkter Anschluss mit eingeklebten Bau-Buchen-Furniersperrholzplatten

An verstärkten Nagelverbindungen (vgl. Abbildung 15, S. 18) zeigten Ehlbeck & Werner (1994, S. 6-7), dass mit mittig eingeklebten 6 mm starken Bau-Buchen-Furniersperrholzplatten die Tragfähigkeit der Stahlstifte um 75 % gegenüber nicht verstärkten Nagelverbindungen gesteigert werden kann, was insbesondere auf die deutlich höhere Lochleibungsfestigkeit der Bau-Buchen-Furniersperrholzplatten gegenüber nativem Holz zurückzuführen ist. Da sich die Nagelanzahl und der Nageldurchmesser sowie die Abmessungen der Holzquerschnitte zwischen den nicht verstärkten und den verstärkten Nagelverbindungen unterschieden, kann die tatsächliche Steigerung der Tragfähigkeit unter gleichen Randbedingungen jedoch nicht ermittelt werden.

2.3.3.4 Verstärkungen von Zangenanschlüssen mittels im Bereich der Scherflächen aufgeklebter Pressfurniersperrholzplatten

Ehlbeck & Werner (1994) verstärkten die Scherfugen einer Zange bestehend aus 40 mm x 100 mm starken Seitenhölzern und einem 50 mm starken Mittelholz mit 10 mm starken Pressfurniersperrholz (vgl. Abbildung 16). Als Verbindungsmittel wurde ein 16 mm starker Passbolzen 8.8 mit einem Randabstand von $5 \times d$ zum Hirnholz eingesetzt. Die rechnerisch ansetzbare Tragfähigkeit der nicht verstärkten Zange bezifferten sie mit 19 kN, die mittlere Bruchlast der verstärkten Zangen lag mit 84,2 kN etwa 4,5-fach höher (Ehlbeck & Werner, 1994, S. 6-26). Die Steigerung der Tragfähigkeit kann hier sowohl durch die lokale Steigerung der Lochleibungsfestigkeit durch das Aufkleben von Pressfurnierholz im Anschlussbereich als auch durch eine lokale Querschnittsvergrößerung erklärt werden.

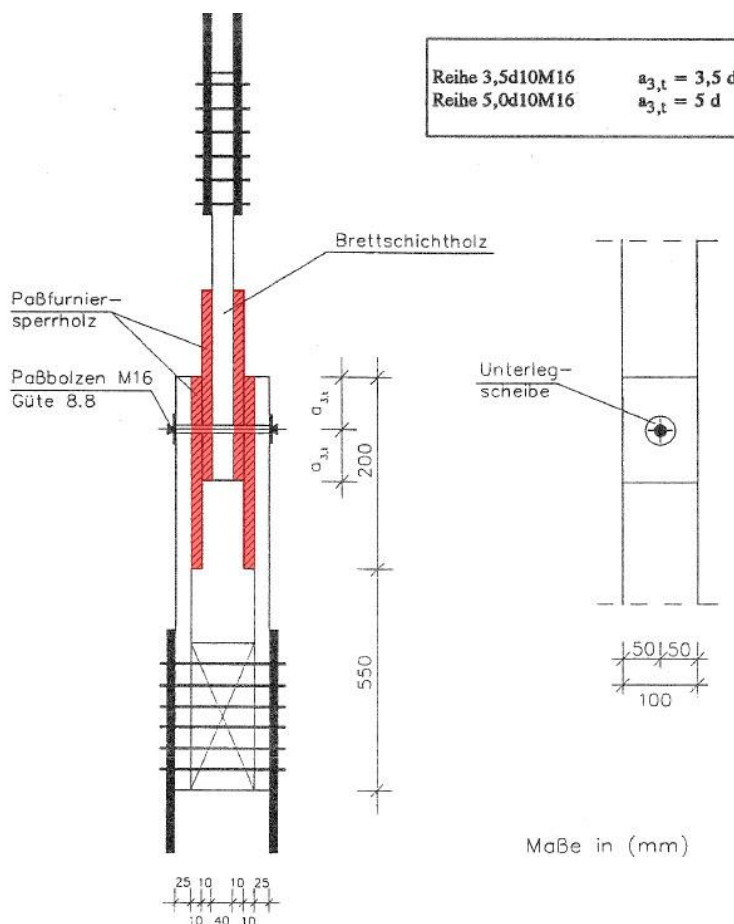


Abbildung 16: Verstärkter Anschluss mit aufgeklebten Passfurniersperrholzplatten

2.3.3.5 Verstärkungen mittels aufgeklebter Holzwerkstoffplatten und der Verwendung von Rohrhülsen

Leijten (1999) untersuchte Holzverbindungen mit Rohrdübeln in - mit unterschiedlichen Holzwerkstoffen verstärkten - Nadelholzquerschnitten. Die Kraftübertragung erfolgt über zweischnittige Holzverbindungen, verstärkt mit verdichtetem Furnierschichtholz oder KP und durch Rohrdübel von 18 mm bis 35 mm Durchmesser. Die dünnwandigen Rohrdübel werden in 1 mm bis 2 mm größere Bohrungen eingeführt und durch hohen Pressdruck an die Lochleibung - durch Plastifizieren des Rohrdübel - expandiert, sodass sich ein vollständiger Formschluss in den Bohrlöchern und damit der gesamten Verbindung einstellt (vgl. Abbildung 17). Die hohe Lochleibungsfestigkeit des verdichteten Furnierschichtholzes und des KPs führt zu einer vergleichsweise hohen Tragfähigkeit und hohen Steifigkeit der Verbindung.

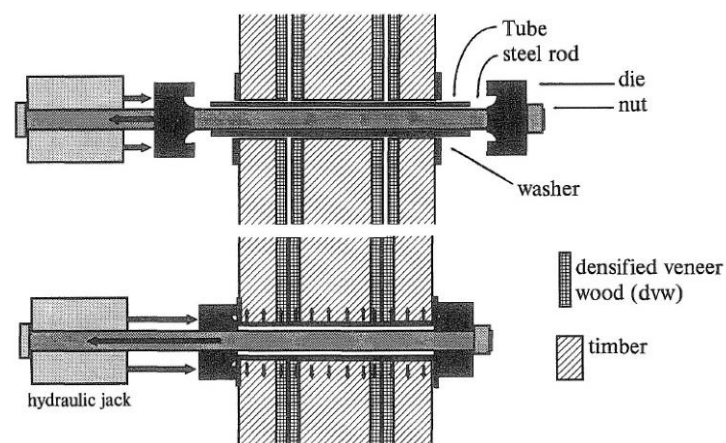


Abbildung 17: Prinzip der Rohrdübelverbindung

Verstärkungen mittels Nageldübel

Blaß, Schmid & Werner (2001) untersuchten das Potential von Verstärkungen mittels Nageldübeln in Nadelholzquerschnitten (vgl. Abbildung 18, S. 21). An einer zugbeanspruchten Zangenkonstruktion wurden im Bereich der Scherfugen an den Seitenlaschen und an der Mittellasche spezielle Nagelplatten eingepresst. Die Nagelplatten waren im Bereich der Stabdübelaufnahme nicht gelocht, sodass die Kraft vom Verbindungsmittel zunächst auf die Platte und dann über die Nägel großflächig in die Holzquerschnitte übertragen wurden. Mit der Verstärkung konnte eine Steigerung der Traglast um ca. das 2,6-fache gegenüber einer reinen Stabdübelverbindung ohne Verstärkung mit Nageldübeln erreicht werden. Im Vergleich zu konventionellen Holzbau-Anschlüssen und im Vergleich zu den zuvor skizzierten Verstärkungsvarianten zeigt die Verstärkung mittels Nageldübel einen starken duktilen Charakter. „Dies stellt einen Vorteil dar, der insbesondere bei einer Wechselbeanspruchung oder bei Einwirkungen durch Erdbeben von großem Vorteil sein kann“ (Blaß, Schmid & Werner, 2001, S. 15).

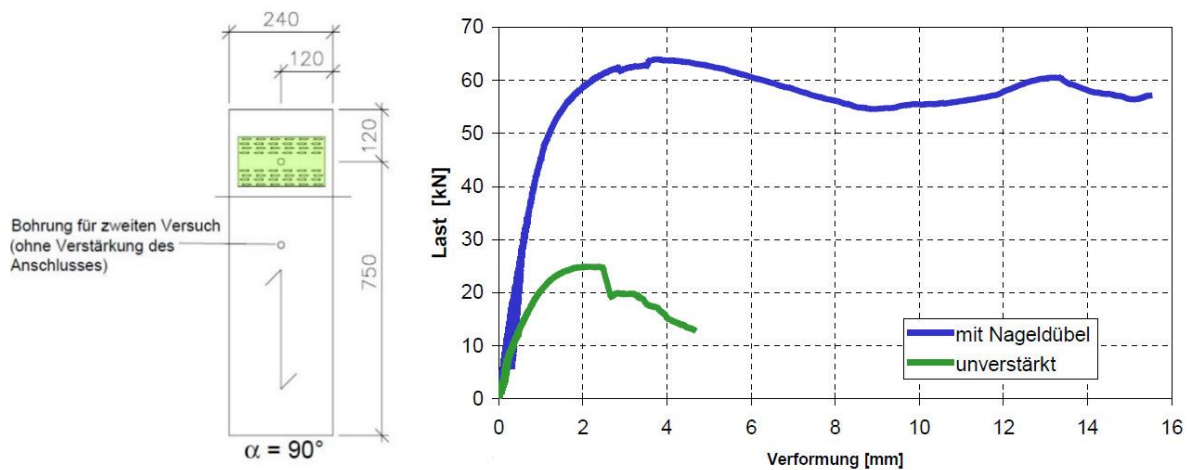


Abbildung 18: Links: Verstärkung mittels Nageldübel, rechts: Lastverformungsdiagramme im Vergleich

2.3.3.6 Verstärkung durch Schichtholz oder Furnierplatten

Zur Verstärkung nativer Schnitt- oder Brettschichthölzer beschreibt Rug (1985, S. 50) drei verschiedene Möglichkeiten „... der Verbesserung der Tragfähigkeit durch Verstärkung des Holzquerschnittes mittels Hölzer oder Holzwerkstoffe höherer Festigkeit ...“ (Rug, 1985, S. 50).

In Möglichkeit eins wird der native Stab durch angeklebte Schichthölzer verstärkt. In Möglichkeit zwei durch aufgeleimte und in Möglichkeit drei durch eingeklebte Furnierplatten (vgl. Abbildung 19). Das Potential der Steigerung wird jedoch nicht näher quantifiziert.

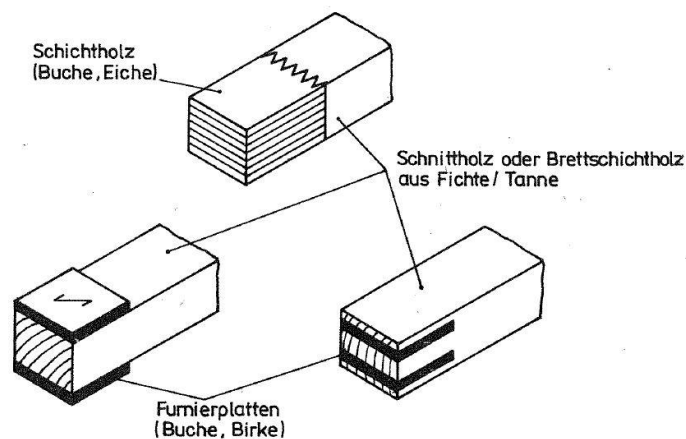


Abbildung 19: Verstärkungsvarianten mit Schichtholz und Furnierplatten

2.3.3.7 Verstärkung mittels eingeklebter CFK-Pads

Heiduschke, (2011, S. 147 ff.) führte Zugprüfungen zum Traglastpotential und Steifigkeitspotential von GFK-verstärkten Bauteilanschlüssen mittels 30 mm – 50 mm starken Bolzen durch. An den Enden eines Brettschichtholzstabs mit den Abmessungen von 9 cm x 22 cm wurden im Abstand von $4 \times d$ der Holzquerschnitt mit eingeklebten, unterschiedlich starken und unterschiedlich aufgebauten CFK-Pads verstärkt. Je nach Stärke wurden die Pads entweder mit einem PUR Klebstoff aufgeklebt oder in runde

Fräsungen mit $d = 175 \text{ mm}$, unter Verwendung eines Epoxidharzklebstoffs, eingeklebt (vgl. Abbildung 20). Um das Potential der Verstärkung zu quantifizieren, wurden Zugversuche an unverstärkten Querschnitten und unter Verwendung gleicher Bolzendurchmesser durchgeführt. Je nach Stärke und Aufbau der GFK-Pads konnte eine Steigerung der Tragfähigkeit um ca. das 6-fache und eine Steigerung der Steifigkeit um ca. das 3-fache gegenüber den unverstärkten Querschnitten erzielt werden.

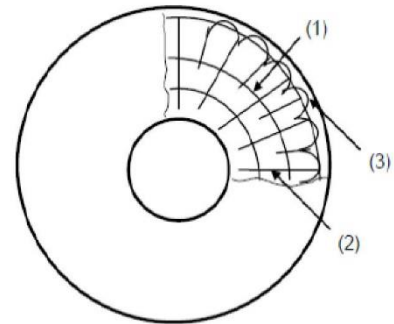


Abbildung 20: Verstärkung mit GFK-Pads

2.3.4 Bewertung der Verstärkungsarten

Die vorgestellten Verstärkungsmaßnahmen führen allesamt zu einer mehr oder weniger starken Steigerung der statischen Leistungsfähigkeit gegenüber unverstärkten Bauteilanschlüssen. Dennoch sind die unterschiedlichen Ansätze kritisch zu hinterfragen und werden nachfolgend diskutiert.

Die einfachste Art der Verstärkung liegt in der Optimierung der stiftförmigen Verbindungsmittel. Zwar wird mit ihnen im eigentlichen Sinn keine Verstärkung der nativen Holzquerschnitte erreicht, die Wirkung ist jedoch gleich: der Einsatz hochwertiger Stähle und - im Durchmesser - kleiner Verbindungsmittel führt zu höheren Traglasten als der Einsatz einfacher Stähle und großer Verbindungsmitteldurchmesser. Hierbei gilt es jedoch zu bedenken, dass mit der Entscheidung für den Einsatz kleiner Verbindungsmitteldurchmesser die Anzahl der Verbindungsmittel und der damit verbundene Aufwand für das Bohren der Löcher und für das Eintreiben der Verbindungsmittel in die Querschnitte zwangsläufig steigt. Die Steigerung der Traglasten ist zudem begrenzt. Bei gleichbleibendem Stabquerschnitt führt die Reduktion des Verbindungsmitteldurchmessers zwar zu höheren Lochleibungsfestigkeiten, jedoch nimmt gleichzeitig die Bolzenschlankheit zu und damit die Tragfähigkeit ab, da sich bei kleineren Durchmessern früher Fließgelenke ausbilden (vgl. Kap. 5.4.8, S. 148). Die Lochleibung wird dadurch ungleichmäßig beansprucht, was zu Spannungsspitzen im Holz führt.

Mit dem Aufkleben von Holzwerkstoffplatten auf native Holzquerschnitte werden die Querschnittsfläche und die Lochleibungsfestigkeit des hybriden Stabkopfes und damit auch die Traglasten der verstärkten Stäbe gesteigert. Das Aufkleben der Platten kann ausschließlich händisch und damit lohnkostenintensiv erfolgen, was eine Preissteigerung der Systemelemente nach sich zieht. Des Weiteren ist die Bemessung der verstärkten Anschlüsse äußerst komplex, da die ohnehin bereits umfangreichen Johansen-Gleichungen (vgl. Kap. 5.3, S. 141) um weitere Eigenschaftsparameter ergänzt werden müssen. Darüber hinaus führt das Aufkleben von Holzwerkstoffplatten ggf. zu einer optischen Beeinträchtigung.

Im Gegensatz dazu, führt die Verstärkung mittels GFK-Pads zu keiner optischen Beeinträchtigung, da die Pads vertieft im Holzquerschnitt angeordnet und sie beim Anschluss an weitere Holzquerschnitte oder beim Anschluss an Stahlplatten verdeckt werden. Die Herstellung der Verstärkung kann jedoch nicht automatisiert erfolgen und muss händisch durchgeführt werden. Der Einsatz der kostenintensiven GFK-Gestricke und der kostenintensiven Epoxidharze sowie ein zusätzlicher Arbeitsschritt durch das Fräsen der Vertiefung, führen zu einer immensen Verteuerung der Einzelelemente.

Auch die Nageldübel fallen optisch weniger stark ins Gewicht, da die Plattenstärken nur wenige Millimeter betragen und sie im Anschlussbereich verdeckt werden. Durch das ausgeprägte duktile Verhalten haben sie entscheidende Vorteile gegenüber den anderen Verstärkungsmöglichkeiten, denn ein Systemversagen kündigt sich frühzeitig durch starke plastische Verformungen an. Jedoch müssen auch hier die Nagelbleche in einem separaten Arbeitsschritt in die Querschnitte gepresst werden. Dafür benötigt man hingegen weniger Arbeitsschritte bei der Montage aufgrund der geringeren Anzahl von Stabdübeln oder Bolzen.

Der Einsatz von expandierenden Rohrhülsen verringert die Anfangsdurchbiegung von Tragstrukturen, da durch das Expandieren der Hülsen der Bauteilschlupf infolge von Fertigungstoleranzen und Montagetoleranzen geschlossen wird. Für Verstärkungen mittels Rohrhülsen sind jedoch Spezialwerkzeuge erforderlich. Zudem ist die Verbindung nicht zerstörungsfrei demontierbar. Im Vergleich zu Bolzen des gleichen Durchmessers haben Rohrhülsen geringere Tragfähigkeiten und Fließmomente, aus diesem Grund ist die Lochleibungsfestigkeit von Rohrhülsen geringer als die von Vollbolzen.

2.3.5 Fazit

Mit jeder der vorgestellten Verstärkungsvarianten ist ein zusätzlicher Fertigungsmehraufwand und auch Materialmehraufwand verbunden. Bis auf Variante Abbildung 19, oben, S. 21 ist keine der anderen vorgestellten Verstärkungsvarianten vollautomatisiert herstellbar, die Implementierung des Fertigungsprozesses in die Fertigungsstraßen von holzverarbeitenden Betrieben ist hier nicht möglich. Aufgrund dessen können keine standardisierten Systemprodukte großseriell und damit kostengünstig hergestellt werden. Die Verstärkungen sind zwar theoretisch möglich, aufgrund der hohen Kosten jedoch wirtschaftlich fraglich. So hat sich bisher keine der aufgeführten Verstärkungsvarianten am Markt etablieren können.

2.3.6 Anforderungen an mit KP verstärkte Systemanschlüsse

Eine Anschlussverstärkung wird sich nur dann am Markt durchsetzen können, wenn sie neben den statischen Vorteilen gegenüber konventionellen Systemen auch wirtschaftliche Vorteile mit sich bringt. Das setzt die Standardisierung solcher Bauprodukte voraus. Die Möglichkeit eines flexiblen Einsatzes in unterschiedlichen Anwendungsbereichen sowie ein architektonisch anspruchsvolles Erscheinungsbild sind weitere wesentliche Faktoren, die dazu beitragen können, dass sich verstärkte Stabsstrukturen am Markt etablieren.

Ziel 1: statische Ziele

Mit der Verstärkung der Stabenden soll die Traglast des Stabanschlusses auf das Niveau des ungeschwächten Stabes angehoben werden, sodass die volle Tragfähigkeit des Stabes für die statische Nachweisführung angesetzt und diese erleichtert werden kann. Mit der Verstärkung sollen hohe Systemsteifigkeiten realisiert werden, damit Anfangsdurchbiegungen durch Systemsetzungen begrenzt werden können. Die Verstärkung soll an Bauholz der Festigkeitsklasse C24 durchgeführt werden und für den Einsatz in Nutzungsklasse 1 und 2 ausgelegt sein.

Ziel 2: wirtschaftliche Ziele

Die Verstärkung soll vollindustriell herstellbar sein. Die Anzahl an Verbindungsmitteln soll minimiert werden; der Aufbau soll schnell und ohne Spezialwerkzeug erfolgen. Die Stablängen sollen so begrenzt sein, dass alle Systemkomponenten auf einer LKW-Ladefläche verstaut und in Container für den weltweiten Versand gestapelt werden können. Die Verstärkung soll für die Bauteilmontage auf der Baustelle ausgelegt und muss wartungsarm sein. Die zerstörungsfreie Demontage der Einzelelemente und die Möglichkeit einer Mehrfachnutzung wird vorausgesetzt.

Ziel 3: konstruktive Ziele

Die zu entwickelnden Stabstrukturen sind aus Grundmodulen, bestehend aus Pfosten, Gurt- und Diagonalstäben, aufzubauen. Die Länge der Module ist so zu wählen, dass sie in das für den Holzbau übliche Grundraster von 62,5 cm intergriert werden können. Die Module sollen so ausgelegt sein, dass sie in verschiedenen statischen Systemen eingesetzt werden können.

Ziel 4: architektonische Ziele

Die Stabverstärkung darf zu keiner negativen ästhetischen Beeinträchtigung des Stabes führen. Der Bauteilanschluss ist so zu gestalten, dass die Tragstruktur selbst als architektonisches Element verstanden werden kann.

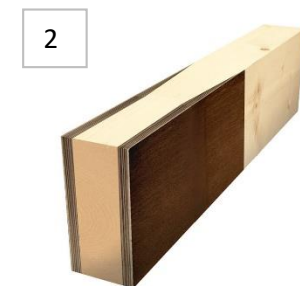
3 Grundlagen

Es werden vier unterschiedliche Stabverstärkungen mit KP (vgl. Abbildung 21) untersucht:



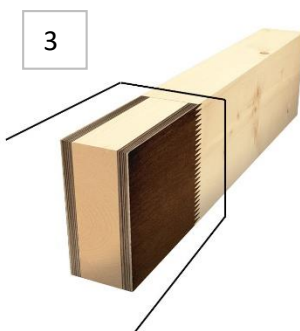
Vollverstärkung mit KP-Kopf

Bei der Vollverstärkung besteht das Stabende vollständig aus KP. Der Hochleistungszellulosewerkstoff wird durch eine Keilzinkenverbindung an den nativen Stabquerschnitt gefügt.



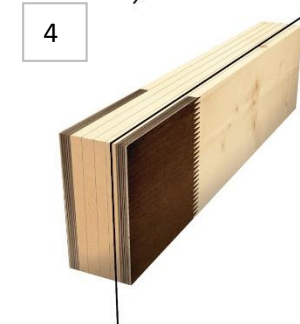
Teilverstärkung mit Schäftung

Bei der links abgebildeten Teilverstärkung werden Teile des Stabendes ausgefräst und an gleicher Stelle KP-Platten mit einer Flächenverklebung und Schäftungsverklebung eingefügt. Die Verstärkung kann ein oder beidseitig erfolgen.



Teilverstärkung mit Sandwich-Kopf

Bei der Teilverstärkung mit einem Holz-KP-Sandwichelement wird der Sandwichkopf mit einer Keilzinkenverbindung an den nativen Stabquerschnitt gefügt. Die Verstärkung kann ein- oder beidseitig erfolgen.



Teilverstärkung mit Hybridlamelle

Die Teilverstärkung mittels Hybridlamelle eignet sich zur Verstärkung von Brettschichtholzquerschnitten. Das Ende der Hybridlamelle besteht aus KP, das mit einer Keilzinkenverbindung an den nativen Holzquerschnitt der Lamelle gefügt wurde. Die Hybridlamelle wird ein oder beidseitig auf den zu verstärkenden Brettschichtholzquerschnitt flächig aufgeklebt.

Abbildung 21: Möglichkeiten zur Verstärkung nativer Holzquerschnitte durch KP

Auf den nachfolgenden Seiten werden diejenigen Materialeigenschaften von Holz und KP vorgestellt, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind.

3.1 Holz

Als anisotroper Werkstoff weist Holz in alle drei Raumrichtungen unterschiedliche mechanische Eigenschaften, wie Festigkeiten und Steifigkeiten, auf. Zudem ist Holz inhomogen, d. h., dass die Eigenschaften über die Länge, Breite und Tiefe eines Holzquerschnitts nicht gleichmäßig verteilt sind, sondern durch verschiedene – z. T. lokal begrenzte Faktoren - mehr oder weniger stark beeinflusst werden. Zu diesen Faktoren zählen wuchsbedingte Faktoren wie die Holzdichte, die Faserorientierung als auch Art und Umfang der Äste. Holzschäden durch Holz zerstörende Pilze, durch Holz zerstörende Insekten sowie durch Blitz- Schwind- und Frostrisse u. v. m. beeinträchtigen die mechanischen Holzeigenschaften zum Teil erheblich. Die Grundbestandteile des Holzes sind Zellulose, Hemizellulose und Lignin, als Nebenbestandteile je nach Holzart unterschiedliche Extraktstoffe, wie ätherische Öle, Harze und Fette. Im Holz werden Zugkräfte vorwiegend über die Zellulose und Druckkräfte über das Lignin abgetragen.

Die mechanischen Eigenschaften von Holz steigen mit:

- zunehmendem Elastizitätsmodul (Glos & Schulz, 1986; in: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 32)
- abnehmendem Astanteil (Görlacher, 1990; in: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 32)
- abnehmender Jahrringbreite (gilt nur für Nadelholz) (Niemz & Sonderegger, 2017, S. 58)
- zunehmender Holzdichte (gilt nur für Nadelholz) (Niemz & Sonderegger, 2017, S. 161)
- abnehmendem Kraft-Faser-Winkel (Bodig & Jayne, 1993; in: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 341)
- abnehmender Belastungsdauer (Bodig & Jayne, 1993; in: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 352)

Neben den genannten Faktoren werden die mechanische Eigenschaften durch die Temperatur (Glos & Henrici, 1990; in: Niemz, 2017, S. 183) und insbesondere durch die Holzfeuchte (Kollmann, 1951; in: Niemz & Sonderegger, 2017, S. 345) beeinflusst.

3.1.1 Zellwand

Holz kann modellhaft als ein System parallel und in Wuchsrichtung des Baumes angeordneter Röhren verstanden werden. Die Röhren (Holzzellen) bestehen aus einem inneren Hohlraum, dem Zelllumen, der durch die Zellwand umschlossen und begrenzt wird.

Das Röhrensystem übernimmt zwei unterschiedliche Aufgaben:

- 1) Das Zelllumen, bildet ein Leitungsnetz, über das Wasser und Nährstoffe zwischen Baumkrone und Baumwurzel transportiert werden. Der Wasser- und Nährstofftransport findet dabei ausschließlich im Zelllumen des Splintholzes statt, während dieser Transport im Zelllumen des Kernholzes weitgehend unterbunden ist (Scheiding et al., 2016, S. 23 f.).
- 2) Die Zellwand stellt das Traggerüst des Baumes dar, über das Eigen-, Wind- und Schneelasten abgetragen werden. Die mechanischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes werden somit durch die Zellwand bestimmt. Je höher der Anteil von Zellwänden und je geringer der Anteil des Zelllumens, desto dichter ist das Holz und desto höher sind die mechanischen Eigenschaften von Holz. Folglich führt eine Veränderung der Zellwand zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften.

Der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften durch wuchsbedingte Faktoren und durch Schadfaktoren kann durch eine visuelle oder maschinelle Holzsortierung begrenzt werden.

3.1.2 Temperatur

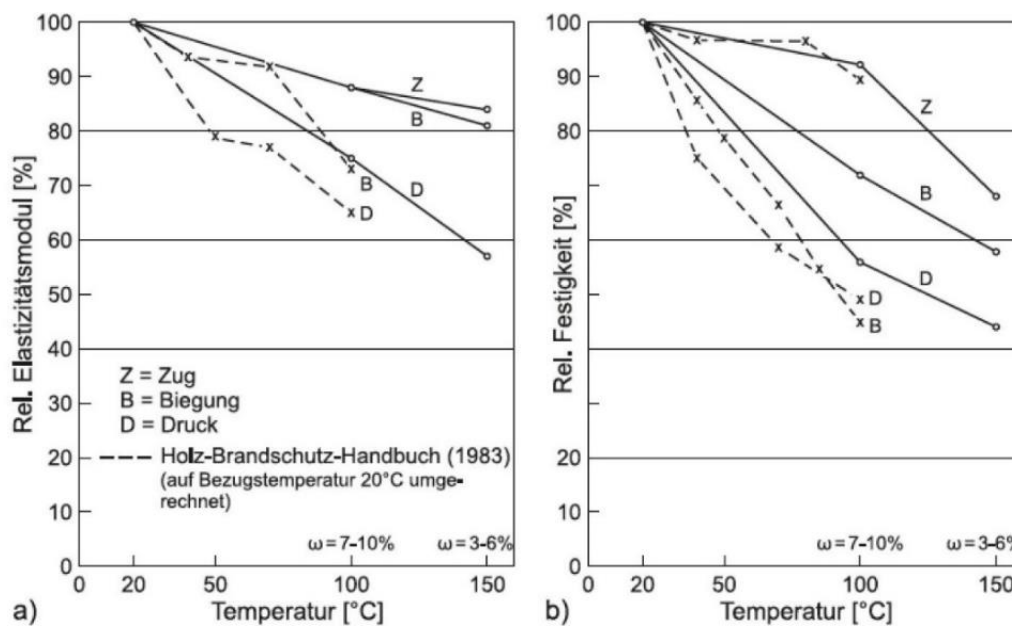


Abbildung 22: Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften von Fichte, (a) relative Änderung des Elastizitätsmoduls, (b) relative Änderung der Festigkeit

Mit steigender Temperatur sinken die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften von Holz. Der im Vergleich zur Zugfestigkeit und Biegefestigkeit deutlich stärkere Abfall der Druckfestigkeit (vgl. Abbildung 22) lässt sich durch ein Erweichen des Lignins erklären (Neuhaus, 2017, S. 157), während die Zellulosefasern, die für die Festigkeit des Holzes maßgeblich verantwortlich sind, deutlich geringer durch die Temperatur beeinflusst werden (Hollmann, 2011, S. 9) (vgl. Abbildung 29, S. 35).

Tabelle 3: Minderung der mechanischen Holzeigenschaften bei 100 °C gegenüber den Werten bei 20 °C

1 Holzfeuchte: 7-10 %; Holzart: Fichte

2 aus Holz-Brandschutz-Handbuch (Kordina Meyer-Ottens, 1983)

Eigenschaften [N/mm ²]	Relativer Wert [%] bei 100 °C (Wert bei 20 °C = 100 %)	
	Bauholz ¹	kleine, fehlerfreie Proben ²
Biegefestigkeit	72	45
Zugfestigkeit	92	89
Druckfestigkeit	56	49
Biege-Elastizitätsmodul	88	73
Zug-Elastizitätsmodul	88	-
Druck-Elastizitätsmodul	75	65

Die unterschiedliche Abhängigkeit der Holzgrundbestandteile von der Temperatur spiegelt sich in den mechanischen Eigenschaften des Holzes wider (vgl. Abbildung 22 & Tabelle 3). Da die charakteristischen Festigkeitskennwerte von Holz unter Normklima und damit bei 20 °C ermittelt wurden und

aufgrund der guten Dämmeigenschaften eine Erhöhung der Holztemperatur selbst im Sommer von nur wenigen Graden möglich ist, ist der Einfluss einer Temperaturerhöhung im baupraktisch relevanten Bereich vernachlässigbar gering.

3.1.3 Feuchte und Holzfeuchte

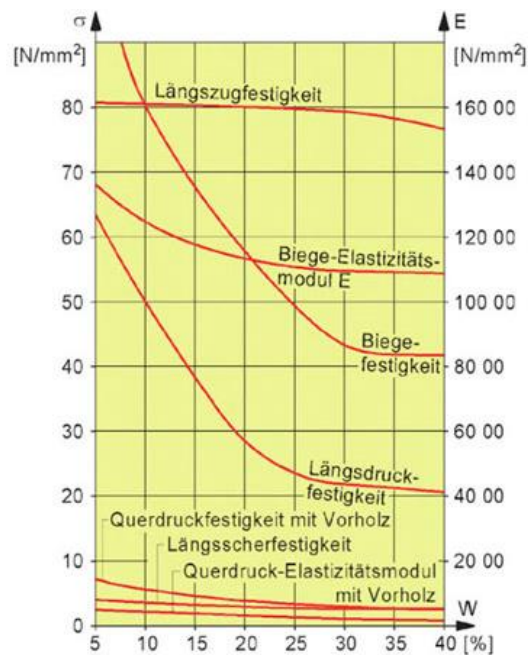


Abbildung 23: Einfluss des Feuchtegehaltes auf die mechanischen Festigkeiten bzw. Elastizitätsmodul bei Fichte (gültig für fehlerfreies Holz)

Mit steigender Holzfeuchte sinken die mechanischen Festigkeiten und Steifigkeiten. Die Biegefestigkeit, Druckfestigkeit längs und quer zur Faser als auch der Biege-Elastizitätsmodul und der Querscher-Elastizitätsmodul nehmen bis zum Erreichen des Fasersättigungspunkt (ca. $u = 30\%$) stark ab (vgl. Abbildung 23). Die Ursache für die Abnahme liegt in der Quellung und damit dem Erweichen der Zellwand bis zum Erreichen der Fasersättigung (vgl. Niemz, 2011, S. 48). Oberhalb des Fasersättigungspunktes findet keine wesentliche Veränderung der Zellwand und damit keine wesentliche Veränderung der Festigkeit und der Steifigkeit mehr statt. Stattdessen füllt sich das Zelllumen mit Wasser, bis die Wassersättigung erreicht ist.

3.1.4 Nutzungsklasse

Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflussen die Holzfeuchte und damit die mechanischen Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Mit der Einteilung von Bauwerken in drei Nutzungsklassen (1, 2, 3 nach DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 25) werden die zu erwartenden Holzfeuchten, die sich während der Nutzungsdauer einstellen, abgeschätzt. In Abhängigkeit der Nutzungsklasse und der zuvor beschriebenen Klasse der Lasteinwirkungsdauer werden dann die mechanischen Eigenschaften entsprechend bestimmt.

Nutzungsklasse 1

„Die Nutzungsklasse 1 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 65% übersteigt“ (DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 25). Für Fichte stellt sich unter einer Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 65% eine Holzfeuchte u von ca. 12% ein (vgl. Abbildung 24, S. 29). Tragwerke, die der Nutzungsklasse 1 zugeordnet werden, sind überdachte Tragwerke in oder über beheizten Innenräumen. Dazu zählen u. a. Wohnräume, Geschäftsräume, beheizte Hallen, wie Sporthallen (ausgenommen Schwimmhallen), Fabrikhallen etc.

Nutzungsklasse 2

„Die Nutzungsklasse 2 ist gekennzeichnet durch einen Feuchtegehalt in den Baustoffen, der einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte der umgebenden Luft entspricht, die nur für einige Wochen je Jahr einen Wert von 85 % übersteigt“ (DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 25). Für Fichte stellt sich unter einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 85 % eine Holzfeuchte u von ca. 18 % ein (vgl. Abbildung 24). Tragwerke, die der Nutzungsklasse 2 zugeordnet werden, sind überdachte unbeheizte Tragwerke. Dazu zählen u. a. Lagerhallen, Viehhallen, Reithallen, Parkhäuser, Carports, vor Schlagregen geschützte Brückentragwerke, etc.

Nutzungsklasse 3

„Die Nutzungsklasse 3 erfasst Klimabedingungen, die zu höheren Feuchtegehalten als in Nutzungsklasse 2 führen“ (DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 25). Tragwerke, die der Nutzungsklasse 3 zugeordnet werden, sind der Witterung ausgesetzte Tragwerke, wie beispielsweise Türme und Brücken ohne entsprechenden Schlagregenschutz.

Holzfeuchten in den Nutzungsklassen 1, 2 und 3

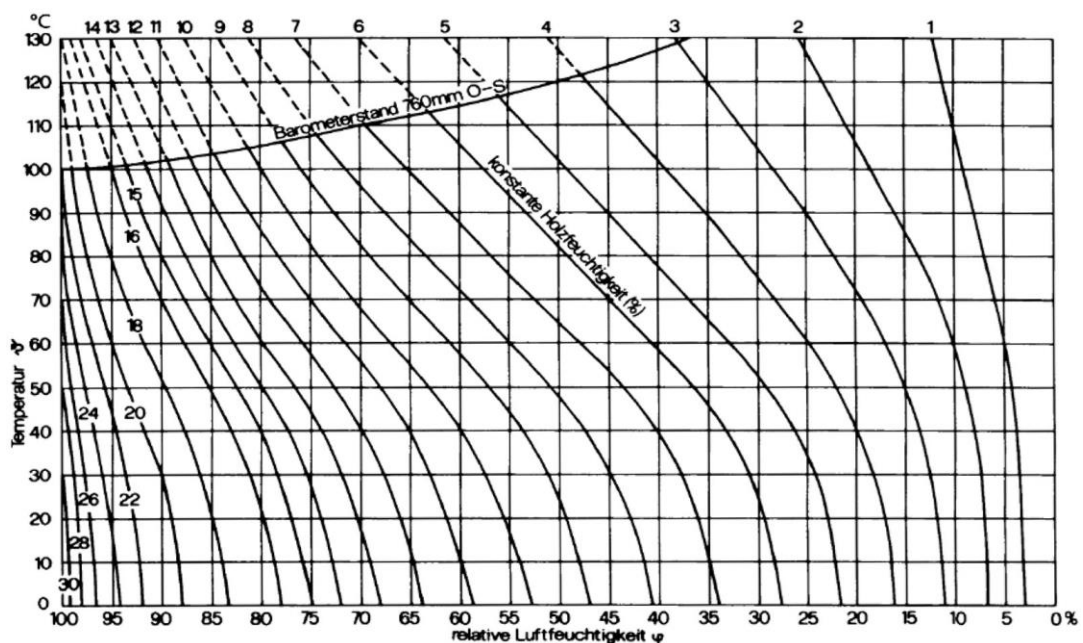


Abbildung 24: Hygroskopisches Gleichgewicht von Sitka-Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur

Wird ein Holzquerschnitt in einem konstanten Klima gelagert, so stellt sich nach ausreichend langer Lagerzeit eine gleichmäßige Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt ein. Eine Steigerung der Luftfeuchtigkeit bei gleichbleibender Temperatur (vgl. Abbildung 25, A & B, S. 30) führt zu einer Erhöhung der Holzfeuchte. Im umgekehrten Fall führt eine Senkung der Luftfeuchtigkeit (vgl. Abbildung 25, C & D) zu einer geringeren Holzfeuchte. Da die Trocknung und die Auffeuchtung über die Außenflächen der Holzquerschnitte geschieht, ist die Holzfeuchte über den Querschnitt i. d. R. nicht konstant verteilt. Die Verteilung der Holzfeuchte über den Querschnitt kann bei einer Holztrocknung und bei einer Holzbefeuchtung nach Abbildung 25 modellhaft als Parabelfunktion wiedergegeben werden. Je größer das

Volumen im Vergleich zur Oberfläche ist, desto träger reagiert das Zentrum des Querschnitts auf Veränderungen von Temperatur und Luftfeuchte. So ist die Schwankung der Holzfeuchte im Zentrum dünner Querschnitte, wie beispielsweise Brettschalungen oder Dachschindeln, um ein Vielfaches größer als im Zentrum massiver Querschnitte, wie Brettschichtholz- oder Vollholzträger.

Das Trocknungs- und Auffeuchteverhalten fällt in Longitudinal-, Radial- und Tangentialrichtung unterschiedlich aus (vgl. Kap. 3.3.1, S. 42) und wird durch die Holzart (vgl. Kap. 3.3.1, S. 42), durch die Rohdichte, Kern- und Splintholz sowie im Holz eingelagerte Extraktstoffe (Schaffrath, 2015, S. 23) beeinflusst. Daneben können Anstriche (z. B. Hirnholzschutz, Bootslack) die Feuchteaufnahme und Feuchteabgabe stark beeinflussen (vgl. Kap. 4.2.7, S. 123).

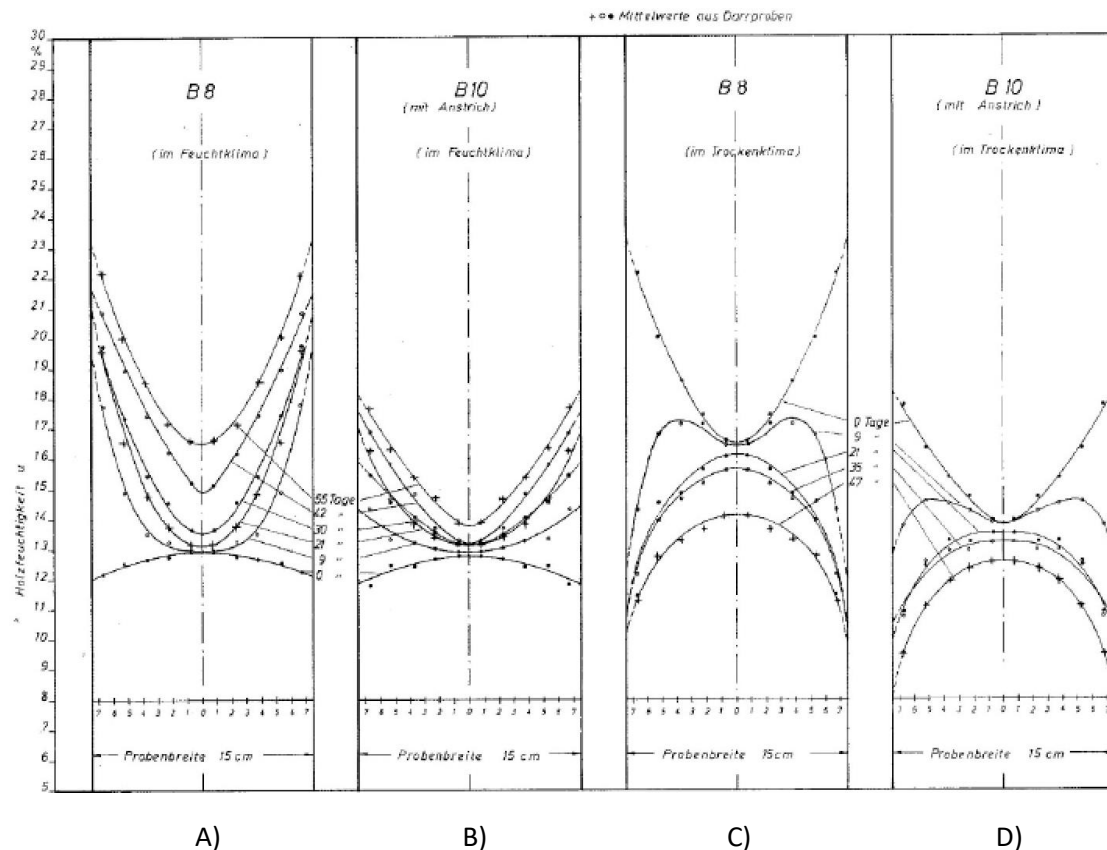


Abbildung 25: Beispielhafte Veränderung der Feuchtegradienten in Brettschichtholz-Bauteilen

3.1.4.1 Schwankungsbereich der Holzfeuchte in den drei Nutzungsklassen

Nutzungsklasse 1

Für dünne Holzquerschnitte wie z. B. Dielen oder Wandbekleidungen in Nutzungsklasse 1 kann im Jahresverlauf von einer maximalen Holzfeuchteschwankung von ca. 10 % ausgegangen werden. In beheizten Innenräumen (20 °C) kann im Winter die relative Luftfeuchte auf ca. 25 - 30 % sinken; die Holzausgleichsfeuchte liegt bei 20 °C und 25 % relativer Luftfeuchtigkeit bei $u = 5$ %. Im Spätsommer steigen die relativen Luftfeuchten bei offenen Fenstern auf ca. 75 - 80 %; die Holzausgleichsfeuchte liegt bei 20 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit bei $u = 16$ %. DIN 1052 (2008, S. 191) beziffert das Holzfeuchtespektrum in Nutzungsklasse 1 von $u = 5$ % bis $u = 15$ %.

Untersuchungen von Gamper et al. (2012) an statisch wirksamen Querschnitten in Nutzungsklasse 1 (Sporthallen und Produktionshallen) zeigten eine Veränderung der oberflächennahen Holzfeuchte u im Jahresverlauf von nur ca. 5 %, die Veränderung der Holzfeuchte u im Kern lag unter 1 %.

Nutzungsklasse 2

Für Tragwerke der Nutzungsklasse 2 kann ortsabhängig und im Jahresverlauf für dünne Holzquerschnitte ebenfalls von einer Holzfeuchteschwankung von ca. 10 % ausgegangen werden. In Abbildung 26 sind die Temperaturverläufe und die Verläufe der relativen Luftfeuchtigkeit für zwei unterschiedliche Regionen in Deutschland aufgeführt. Für die jeweilige Kombination aus Temperatur und Luftfeuchte sind die entsprechenden Holzausgleichfeuchten unten dargestellt. Für die beiden in Abbildung 26 exemplarisch aufgeführten Regionen schwanken die Holzfeuchten um 7 % bis 9 %. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Datengrundlage von Trübswetter (2009, S. 29) eine stärkere Trocknung durch eine direkte Besonnung und damit lokal erhöhte Trocknungen nicht berücksichtigt. Die bereits aufgeführten Untersuchungen der TU München an statisch wirksamen Querschnitten in Nutzungsklasse 2 (Reithallen, landwirtschaftliche Hallen) zeigten eine Veränderung der oberflächennahen Holzfeuchte im Jahresverlauf von bis zu ca. 10 %, die Veränderung der Holzfeuchte u im Kern lag unter 2 %. DIN 1052 (2008, S. 191) beziffert das Holzfeuchtespektrum in Nutzungsklasse 2 von $u = 10\%$ bis $u = 20\%$.

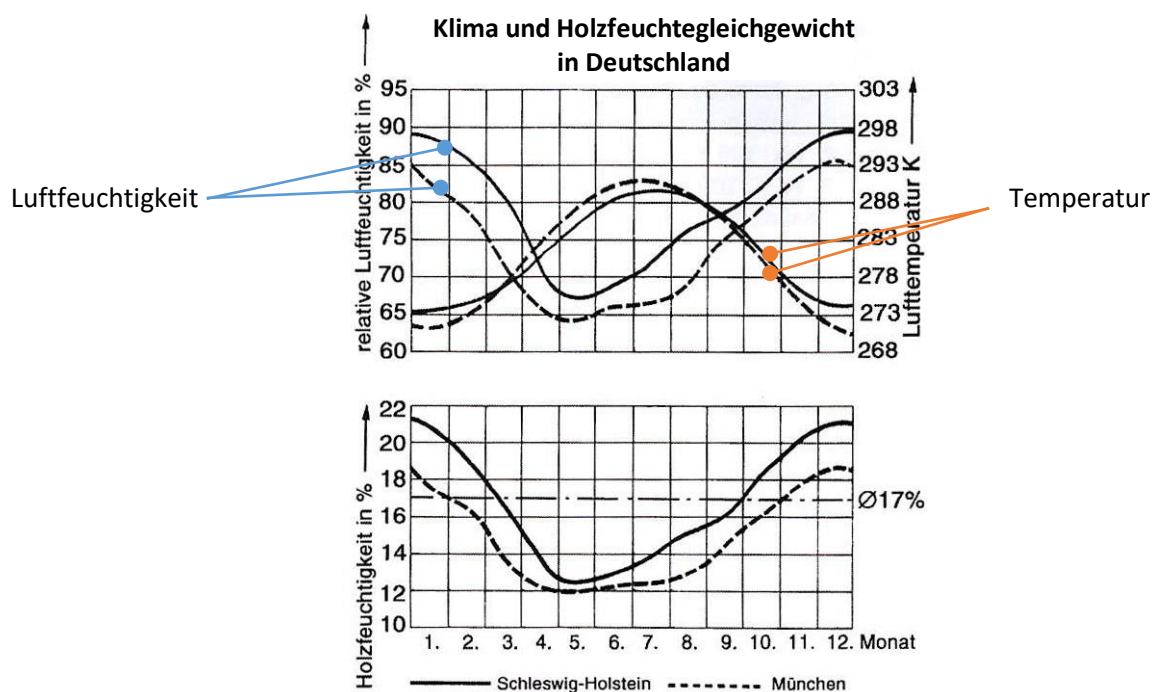


Abbildung 26: Oben: Jahresverlauf von Temperatur und Luftfeuchte für Schleswig - Holstein und für Oberbayern.
Unten: Holzausgleichsfeuchten in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchte

Nutzungsklasse 3

Tragwerke der Nutzungsklasse 3 sind der Witterung unmittelbar ausgesetzt. Hier kann Schlagregen zu einer starken lokalen Auffeuchtung der Holzquerschnitte führen. Andererseits kann aber auch eine der Sonneneinstrahlung exponierte Ausrichtung der Holzoberfläche zu einer starken lokalen Trocknung der Oberflächen führen. Dies hat zur Folge, dass sich einerseits minimale Holzfeuchten ähnlich derer

in Nutzungsklasse 1, sprich 5 %, andererseits temporär aber auch Holzfeuchten oberhalb der Fasersättigung, sprich 30 % einstellen können. Zwar beziffert DIN 1052 (2008, S. 191) das Holzfeuchtespektrum in Nutzungsklasse 3 von $u = 12\%$ bis $u = 24\%$, jedoch ist davon auszugehen, dass sich – zwar zeitlich und örtlich begrenzt – zyklische Holzfeuchteschwankungen von bis zu 25 % vollziehen können.

Die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Holzfeuchte (wie auch der Temperatur) wird ebenso wie die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Belastungsdauer bei der statischen Nachweisführung durch den Modifikationsbeiwert k_{mod} nach DIN EN 1995-1-1/NA, 2013 berücksichtigt.

Tabelle 4: Rechenwerte für die Modifikationsbeiwerte k_{mod} für Holz, Holz- und Gipswerkstoffe

	1	2	3	4				
1	Baustoff	Norm	Nutzungs- klasse	Klasse der Lasteinwirkungsdauer				
				ständige Einwir- kung	lange Einwir- kung	mittlere Einwir- kung	kurze Einwir- kung	sehr kurze Einwir- kung
2	Balkenschichtholz, Brettsperrholz, Massivholzplatten		1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
			2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
3	Gipsplatten (Typen GKB ^a , GKF ^a , GKBI und GKFI), Gipsfaserplatten	DIN 18180, DIN EN 15283-2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10
			2	0,15	0,30	0,45	0,60	0,80
4	Zementgebundene Spanplatten		1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
			2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
^a Nur Nutzungsklasse 1								

Der Bemessungswert der Holzfestigkeit berechnet sich mit:

$$f_d = f_k \times k_{mod} \times \frac{1}{\gamma_M}$$

f_d Bemessungswert der Festigkeit

f_k Charakteristischer Wert der Festigkeit

k_{mod} Modifikationsbeiwert

γ_M Sicherheitsbeiwert, für Holz und Holzwerkstoffe = 1,3 nach (DIN EN 1995-1-1/NA, 2013, S.18)

Für die Bemessung der Biege- und der Zugfestigkeit ist ggf. der Höhenfaktor k_h und für die Bemessung der Scherfestigkeit der Rissbeiwert k_{cr} zu berücksichtigen.

3.1.5 Belastungsdauer

Hölzer, die einer Dauerbelastung ausgesetzt sind, zeigen innerhalb der ersten 6 Tage einen deutlichen Abfall der Holzfestigkeit. Die sogenannte „... Dauerstandfestigkeit ist die Spannung, die ein Werkstoff bei unendlich langer Belastung gerade noch aushält ohne zu brechen“ (Niemz & Sonderegger, 2017, S. 302). Sie beträgt ca. 60 % der Ausgangsfestigkeit (vgl. Abbildung 27). Nach ca. einer Woche ist die Dauerstandfestigkeit erreicht, im Anschluss daran bleibt die Holzfestigkeit konstant.

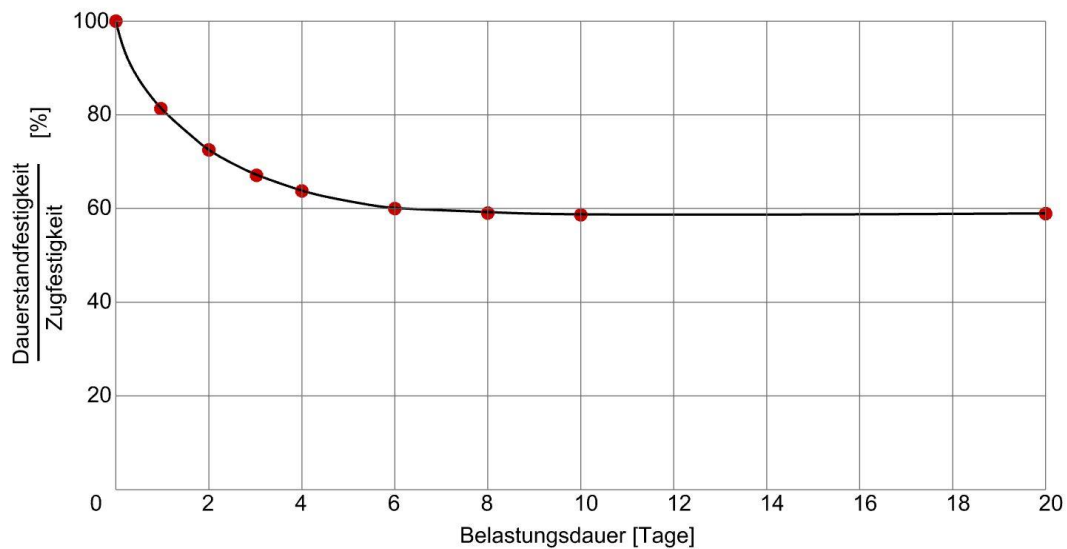


Abbildung 27: Dauerstandzugfestigkeit von Kiefernholz

3.2 Kunstharzpressholz (KP)

KP ist ein Holzwerkstoff, der durch dauerhafte Verdichtung der Holzstruktur quer zur Faser unter Zugabe von Kunstharzpolymer hergestellt wird. KP kann sowohl aus einzelnen übereinander geschichteten Furnieren als auch labormaßstäblich aus ganzen Holzquerschnitten (Bretter, Bohlen) hergestellt werden. Es ist dabei möglich sowohl den gesamten Materialquerschnitt oder nur lokale Bereiche nahe der Oberfläche zu verdichten. Industriell wird KP jedoch ausschließlich aus geschichteten Furnieren, die während der Herstellung annähernd gleichmäßig verdichtet werden, aufgebaut. Das erste Patent zu KP wurde in Deutschland 1923 ⁴ erteilt.

In (DIN 7707-2, 1979, S. 1) wird KP wie folgt definiert:

„Kunstharz-Pressholz (KP) ist ein Schichtpressstoff [. . .], der aus Rotbuchen-Furnieren (*Fagus silvatica* [sic!]) und härtbarem Kunstharz [. . .], hergestellt ist. Seine Rohdichte beträgt mindestens 0,8 g/cm³; die Anzahl der Furnier-Schichten ist mindestens 5 Lagen je cm Erzeugnisdicke.“ Ferner wird auch der Mindestanteil an Phenolharz mit 8 % festgesetzt. Als Kunstharze können aber auch Melaminharze, Epoxidharze oder Polyesterharze eingesetzt werden.

⁴ Verfahren zur Herstellung veredelten Holzes. Patentschriftnummer 357385, Berlin.

3.2.1 Pressholz

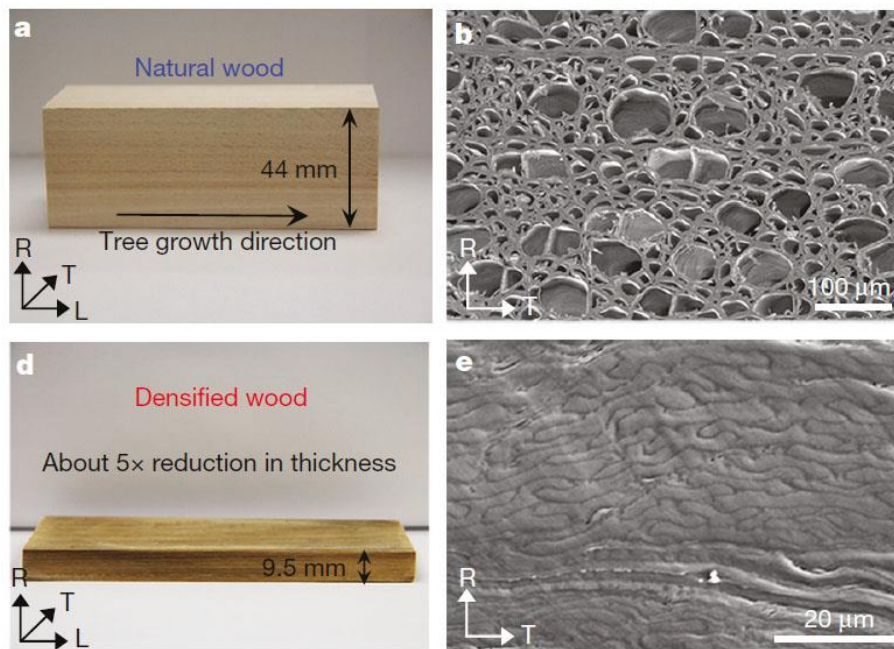


Abbildung 28: Vergleich des Querschnitts und der Zellstruktur vor und nach der Verdichtung

Eine Verdichtung von Holz quer zur Faser bewirkt allgemein - insbesondere bei Hölzern mit von Natur aus geringem spezifischem Gewicht - eine Leistungssteigerung der mechanischen Eigenschaften, wie Festigkeit und Steifigkeit. Diese Leistungssteigerung beruht auf der Tatsache, dass mit der Verdichtung die natürlichen – unterhalb des Fasersättigungspunktes – luftgefüllten Hohlräume (Zelllumen von Tracheiden und Gefäßen) durch das aneinander Falten der Zellwände geschlossen werden und somit - bezogen auf die Querschnittsfläche - mehr Zellwände und damit Holzfasern zum Lastabtrag zur Verfügung stehen (vgl. Abbildung 28 b und e). Bei vollständiger Verdichtung der Holzstruktur und damit vollständiger Verdrängung des Luftanteils der Holzzellen setzt sich die Holzdichte anteilig aus den Reindichten von Hemizellulose ($\sim 1,5 \text{ g / cm}^3$), Zellulose ($1,59 \text{ g / cm}^3$), Lignin ($1,4 \text{ g / cm}^3$) (Bosshard, 1984, S. 188) und Holzinhaltsstoffen zusammen. Dabei variieren die Anteile der Holzbestandteile von Holzart zu Holzart. Allgemein kann die Reindichte von Holz mit ca. $1,5 \text{ g / cm}^3$ beziffert werden.

Eine Verdichtung von Holz ist sowohl bei Nadel- als auch Laubholz möglich. Sie findet zunächst in niederfesten Regionen, wie beispielsweise dem Nadelfrühholz statt, bevor auch dichtere Regionen wie das Nadelspätholz komprimiert werden. Um die Pressdrücke und Presszeit, die zur Verdichtung von Holz notwendig sind, möglichst gering zu halten, kann die Holzfeuchte wie auch die Holztemperatur während der Verdichtung gesteigert werden (vgl. Morsing & Hoffmeyer, 1998, S. 25 & S. 70 ff.). Beide Faktoren beeinflussen Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften von Holz und wirken sich damit nachhaltig auf den Herstellungsprozess von Presshölzern aus (vgl. Abbildung 23, S. 28 und Abbildung 29, S. 35). So ist es auch möglich, Bereiche nahe der Querschnittsoberfläche durch gezieltes Aufweichen und anschließende thermische Behandlung, zu verdichten (Surface Densification), während tieferliegende Regionen weitgehend unverändert bleiben (Morsing & Hoffmeyer, 1998, S. 28). Eine Verdichtung von nativem Holz ist nicht von Dauer. Verdichtetes Holz kehrt mit zunehmender Holzfeuchte durch „Entfaltungen der (...) Zellwände“ (Putzger, 2011, S. 115) in seinen Ausgangszustand zurück, wobei eine Restdeformation durch Holzschädigung infolge des Pressens vorhanden bleibt (Gril et al., 1994, zitiert nach Morsing & Hoffmeyer, 1998, S. 54). Um eine dauerhafte Verdichtung gewährleisten zu können,

muss das Entfalten der deformierten Zellwände unterbunden werden, was beispielsweise durch das Einbringen von Kunstharz in das Holz erreicht werden kann.

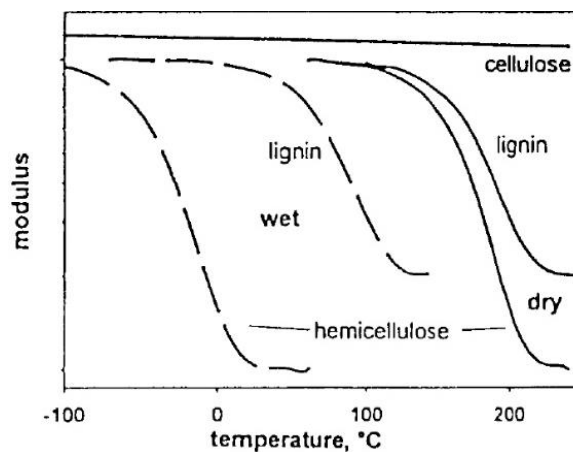


Abbildung 29: Qualitative Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte auf die Steifigkeit von Lignin, Hemizellulose und Zellulose

3.2.2 KP aus verdichteten Schäl furnieren und Kunstharzpolymer

Für die Herstellung von KP aus Furnieren werden üblicherweise Schäl furniere der Rotbuche (*Fagus sylvatica*)⁵ verwendet. Der Holzwerkstoff kann je nach Anwendungsfall individuell hergestellt und dabei auf die physikalischen Anforderungen abgestimmt werden, was die Fülle an verschiedenen, am Markt erhältlichen Kunstharzpresshölzern, zeigt. Die Eigenschaften können durch die Qualität und Orientierung der Schäl furniere, die Menge und der Art des Kunstharzpolymers und durch diverse Prozessparameter gesteuert werden. Darüber hinaus können für Spezialanwendungen auch Faserverbundwerkstoffe in das Schichtgefüge integriert werden.

Die Herstellung des Materials verläuft in zwei aufeinander folgenden Teilschritten:

Teilschritt 1

Im ersten Schritt werden die Furniere entweder mit Phenolharz benetzt oder unter Vakuum vollständig mit Phenolharz imprägniert. Für eine vollständige Durchtränkung eignen sich gut tränk bare Hölzer wie Buchen- oder Kiefern splintholz (s. EN 350-2, 1994). Das Phenolharz dringt dabei sowohl in das Zelllumen als auch in die Zellwand ein und wird dort chemisch an die Hydroxylgruppen und damit jene Gruppen, die das Quellen von Holz durch Wasseraufnahme bedingen, gebunden (Stamm & Seborg, 1941, S. 4). Dabei hat das Molekulargewicht des Phenolharzes entscheidenden Einfluss darüber, wo und in welchem Umfang das Phenolharz sich im Holz anlagert und inwieweit es zur Formstabilität beiträgt. Harze mit einem geringen Molekulargewicht von 290 bis 470 sind leicht in der Lage in die Zellwand einzudringen, während Harze mit höherem Molekulargewicht bis 820 sich fast ausschließlich im Zelllumen anreichern (Furuno et al., 2004). Je größer der Anteil an Polymer innerhalb der Zellwand ist, desto geringer ist die Wasseraufnahmefähigkeit der Zellwand und desto geringer sind Schwind- und Quellverformungen des Materials. Im Gegensatz zu niedermolekularen Phenolharzen haben hochmolekulare Phenolharze nur einen geringen Einfluss auf die Formstabilität des Holzes, sie füllen zwar das

⁵ Weitere Holzarten: Hainbuche, Ahorn, Birke, Esche ...

Zelllumen aus, dringen jedoch nicht in die Zellwand ein und verhindern somit nicht, dass sich Wasser in der Zellwand einlagern kann. Ein Quellen der Zellwand wird damit nicht unterbunden (Furuno et al., 2004). In Abbildung 30 ist zu sehen, dass das niedermolekulare Kunstharz sowohl in die Zellwände eingedrungen ist (1 - schwarze Färbung) als auch das Zelllumen in Teilen ausgefüllt (3 - schwarze Färbung) hat. Darüber hinaus liegt jedoch in einigen Bereichen des Querschnitts (2 - fehlende schwarze Färbung) kein visuell erkennbares Eindringen von Kunstharz in die Zellwand vor.

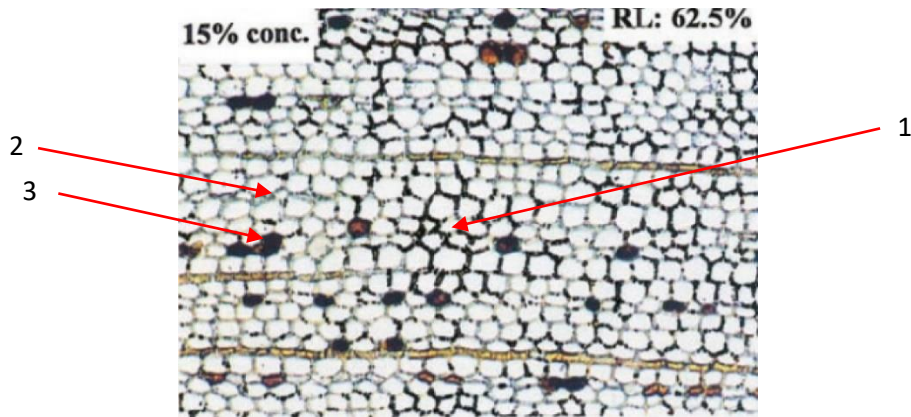


Abbildung 30: Lichtmikroskop-Aufnahme der Zellwandstruktur von „sugi sapwood“ im Querschnitt. Verwendung von Kunstharzpolymer mit niedrigem Molekulargewicht von 290

Teilschritt 2

Nach dem Einbringen des Kunstharzpolymers in die Furniere werden diese im zweiten Schritt aufeinander geschichtet, dabei kann die Ausrichtung der Furnierlagen in Abhängigkeit des Anwendungsfalls erfolgen. Die Schichtmuster variieren von ausschließlicher Längsorientierung (Schichtholz; KPSCHE), in Wechselorientierung - längs und quer - (Sperrholz; KPSP) bis hin zu einer sternförmigen Orientierung (Sternholz; KPSN). Des Weiteren ist auch eine tangentielle Schichtung für Ringplatten möglich, bei der die Furniere in Kreisstücken so ausgerichtet sind, dass die Fasern weitgehend tangential verlaufen. Kriterien der Schichtanordnung können der DIN 7707-2 (1979, S. 1) entnommen werden.

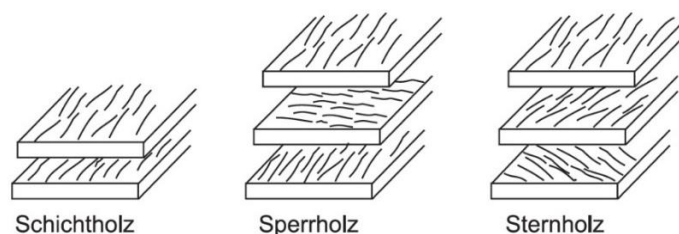


Abbildung 31: Prinzip-Skizze zum Aufbau von KP

Anschließend werden die aufeinander geschichteten Furniere unter hoher Temperatur (ca. 90 °C) und hohem Druck quer zur Faser (ca. 20 N / mm²) verdichtet (Schmeing, 2017). Temperatur und Pressdruck variieren je nach Hersteller und Material. Die Dichte der Ausgangsfurniere liegt um ca. 0,7 g / cm³; die Dichte des KPs bei ca. 1,4 g / cm³, was in etwa auch der Dichte des Phenolharzes (1,5 g / cm³) entspricht. Während des Prozesses verflüssigen die Phenolharze, verkleben die Furnierlagen untereinander und kondensieren anschließend zu einem dauerhaften temperatur- und feuchtebeständigen Duromer. Die Presszeit beträgt ca. 1 min / 1 mm Materialstärke (Schmeing, 2017). Die Stärke der so hergestellten KP-Platten ist technisch auf 70 mm begrenzt.

An der Oberfläche der KP-Platten bildet sich im Herstellungsprozess eine Presshaut, die im Gegensatz zum Kern höher verdichtet und damit auch höhere Festigkeiten aufweist (Schmeing, 2017). Stärkere Querschnitte mit über den Querschnitt möglichst gleichbleibenden mechanischen Eigenschaften können somit erst durch das Verkleben einzelner KP-Platten ermöglicht werden.

Prinzipiell verbessern sich die mechanischen Eigenschaften bei steigender Qualität der Furniere, Abnahme der Furnierstärken und Steigerung von Pressdruck, Temperatur und Presszeit während des Herstellungsprozesses (Schmeing, 2017). KP ist aufgrund des für die Herstellung nötigen, hohen Energieaufwandes, der teuren Ausgangsfurniere und der relativ hohen Lohnkosten um ein Vielfaches teurer als natives Bauholz. Für das innerhalb dieser Arbeit thematisierte Material Dehonit BE 335-1 liegen die Materialkosten bei ca. 6 € / kg bzw. ca. 8.100 € / m³ (Schmeing, 2017).

Im Gegensatz zu Pressholz, aber auch im Gegensatz zu oberflächenimprägniertem KP, ist die Verdichtung bei vollständig durchtränkten Ausgangsfurnieren irreversibel, da bei vollständig durchtränkten Furnieren der Werkstoff ein äußerst geringes Wasseraufnahmevermögen zeigt (vgl. Kap. 3.3.1) und es somit zu keinem Quellen der Holzfasern kommt.

3.2.3 KP – Materialeigenschaften und Werkstoffbeschreibung

Verglichen mit nativem Holz weist KP deutlich höhere mechanische Festigkeiten und Steifigkeiten auf. Durch eine Sortierung der Ausgangsfurniere, können Holzfehler weitgehend ausgeschlossen werden. Dadurch streuen die Eigenschaften der Ausgangsfurniere und die Eigenschaften des Holzwerkstoffes im Vergleich zu Holz nur sehr gering, was äußerst hohe charakteristische Festigkeitskennwerte zur Folge hat. Darüber hinaus zeichnet sich KP durch seine überaus geringe Wasseraufnahmefähigkeit aus. Nach Haller et al. (2015) liegt je nach Tränkungsgrad des Buchenfurniers mit Polymer die Wasseraufnahme lediglich zwischen 0,7 % und 5,0 % und damit weit unterhalb der Wasseraufnahme von nativem Holz.

An eigenen Versuchen (vgl. Kap. 3.3.1, S. 42) konnte bei ausreichend langer Wasserlagerung eine Wasseraufnahme von 10 % bis 20 % dokumentiert werden. Die vergleichsweise geringe bzw. langsame Wasseraufnahme erklärt die Dauerhaftigkeit des Holzwerkstoffs gegenüber biotischen Schädlingen (Pilze, Insekten, Bakterien).

Unter Druckbeanspruchung senkrecht zu den Furnierlagen (Abbildung 32, Kurve 1) wie auch unter Zugbeanspruchung in Richtung der Furnierlagen (Abbildung 32, Kurve 4) als auch unter Biegebeanspruchung (Abbildung 32, Kurve 3) verhält sich KP nahezu ideal-spröde. Im Vorfeld des Bruches tritt kein Plastifizieren auf. Der Bruch tritt spontan und schlagartig ein. Unter einer Zugbeanspruchung zeigt sich ein kurzfaseriges Bruchbild (Abbildung 33, unten rechts). Das Druckversagen quer zu den Furnierlagen äußert sich in einem vollständigem *Zerbersten* des Prüfkörpers (Abbildung 33, unten Mitte). Unter einer Druckbeanspruchung in Richtung der Furnierlagen (Abbildung 32, Kurve 2) zeigt sich bei ca. 75 % der Höchstlast ein zunehmendes Plastifizieren. Das Material versagt aufgrund von Knicken der in Richtung der Druckbeanspruchung ausgerichteten Längsfurniere (Abbildung 33, unten links). Die im Zugversuch ermittelte Bruchdehnung lag bei ca. 0,7 %.

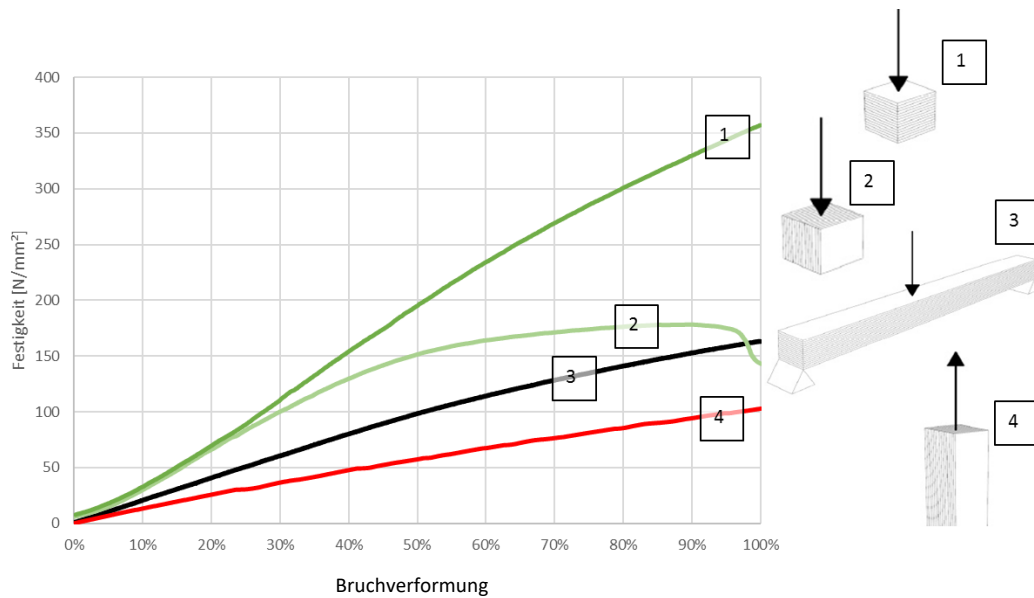


Abbildung 32: Qualitatives Verformungsverhalten von KP BE 335-1

Die mechanischen Eigenschaften von Nadelholz C24 und KP BE 335-1 können Tabelle 30, S. A-2 und Tabelle 31, S. A-2 entnommen werden. „KP kann man sägen, hobeln, fräsen, schleifen, bohren, drehen, verkleben, polieren, lackieren und mit Gewinde versehen“ (dehonit, 2018, S. 3). Es können dabei Werkzeuge aus der Holzbearbeitung verwendet werden. Dabei ist anzumerken, dass die Werkzeuge deutlich stärker beansprucht werden als bei der Bearbeitung von nativem Holz. Die Abnutzung der Werkzeuge bei der Bearbeitung von KP ist vergleichbar mit der Abnutzung bei der Bearbeitung von Aluminium (Schmeing, 2017).

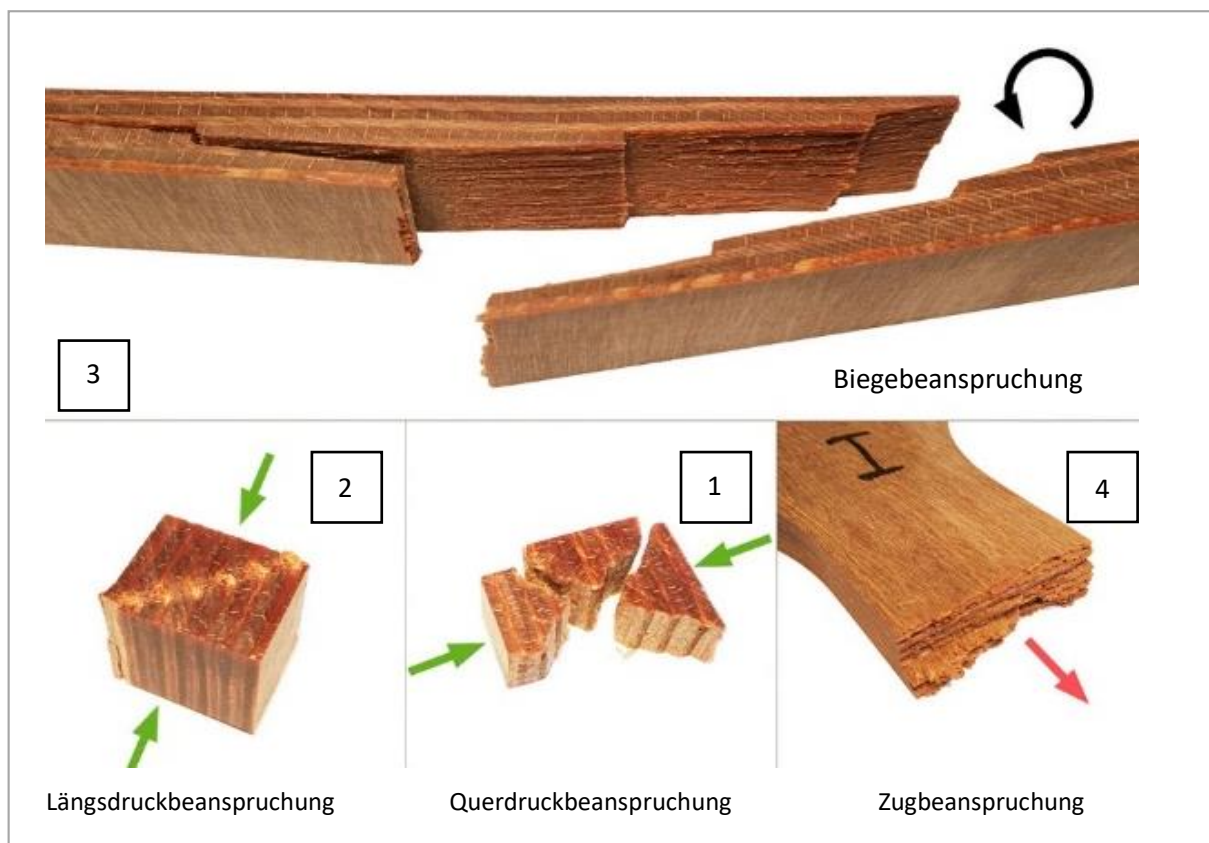


Abbildung 33: Arten des Materialversagens von KP

3.2.3.1 Einfluss der Furnierorientierung auf die mechanischen Eigenschaften

Neben den auf Seite 36 und Seite 40 bereits genannten Faktoren, haben die Furnierstärke und die Furnierorientierung großen Einfluss auf die Materialeigenschaften. Je dünner die Ausgangsfurniere sind, desto homogener sind die Materialeigenschaften. Werden alle Furniere in eine der Hauptachsen orientiert, spricht man von einem Schichtholz (KPSCH), dessen Druck- und Zugfestigkeit in der Plattenebene entlang dieser Hauptachse maximal, und quer zu dieser minimal ist (vgl. Kap. 3.4, Abbildung 46, S. 51).

Die größte Druckfestigkeit in Plattenebene wird unter Verwendung großer Furnierstärken erreicht, während die größte Zugfestigkeit unter Verwendung kleiner Furnierstärken erreicht wird. Hohe Biegefestigkeiten werden ebenfalls mit KPSCH mit dünnen Furnierstärken erreicht. Die größte Querdrukfestigkeit liegt bei KPSP (Sperrholz) mit großen Furnierstärken. (Ehlbeck & Hättich, 1986)

Die höchsten Festigkeiten zeigen sich an dünnen KP-Querschnitten, da hier der Anteil der höherfesten Presshaut verhältnismäßig hoch ist (Schmeing, 2017).

3.2.3.2 Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften

Wie für Duomere charakteristisch, wirkt sich eine Zunahme der Temperatur nur unwesentlich auf die mechanischen Eigenschaften von KP aus, sodass im baupraktisch relevanten Temperaturbereich von - 10 °C bis + 30 °C keine signifikante Veränderung von Festigkeit und Steifigkeit des Werkstoffs einhergeht (vgl. Schlagzähigkeitsversuche in: Hauck, 1948, zitiert nach Kollmann, 1952).

3.2.3.3 Einfluss der Luftfeuchte auf die mechanischen Eigenschaften

Die Holzausgleichsfeuchte, die sich in KP unter Normalklima mit $u = 5,0 \%$ bis $u = 9,3 \%$ einstellt, liegt deutlich unterhalb der Holzausgleichsfeuchte, die sich in nativem Buchenholz unter den gleichen Bedingungen mit $u = 12 \%$ einstellen würde. Durch das Kunstharz innerhalb der Zellwand verlangsamt sich die Wasseraufnahme im Vergleich zu nativem Holz erheblich. Ist das KP vollimprägniert, d. h. die Zellwand vollkommen mit KP durchtränkt, dann ist die Wasserleitung im Holzwerkstoff praktisch vollkommen unterbunden (s. S. 36) und die Werkstoffeigenschaften werden nicht durch unterschiedliche Luftfeuchten beeinflusst (vgl. Kap. 3.3.1).

3.2.3.4 Einfluss von Schichtfehlern auf die mechanischen Eigenschaften

Obwohl mit einer Sortierung der Schälurniere Holzfehler gemäß DIN 4074-1 (2012) weitgehend minimiert werden können, zeigt sich, dass in KP - aufgrund der Schichtung der Furniere - Schichtungsfehler auftreten können, im Bereich derer das Materialversagen eintreten kann, was die Festigkeit des Holzwerkstoffes beeinflusst. Diese Schichtungsfehler wirken sich sowohl unter einer Zug- als auch unter einer Lochleibungsbeanspruchung festigkeitsmindernd aus. Weil die Länge und die Breite der Schälurniere begrenzt sind, müssen Querschnitte einer größeren Abmessung gestoßene Furnierlagen aufweisen. In KP können 4 Arten von Materialstößen auftreten, diese sind: (vgl. Abbildung 34, S. 40)

- a) Stumpfer Stoß in Querlage mit partiellem Fehlen der Querlage = Schichtfehler Typ 2
- b) Überlappung in Querlage = Schichtfehler Typ 1
- c) Stumpfer Stoß in Längslage mit partiellem Fehlen der Längslage
- d) Überlappung in Längslage

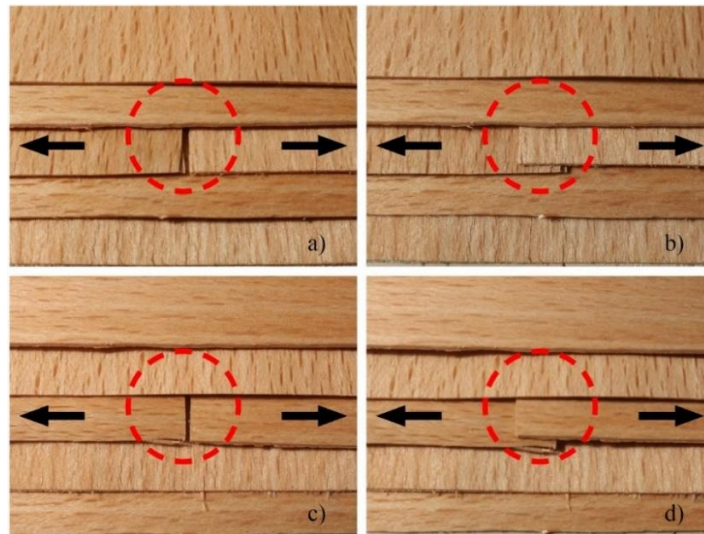


Abbildung 34: Schichtfehler im Aufbau von KP

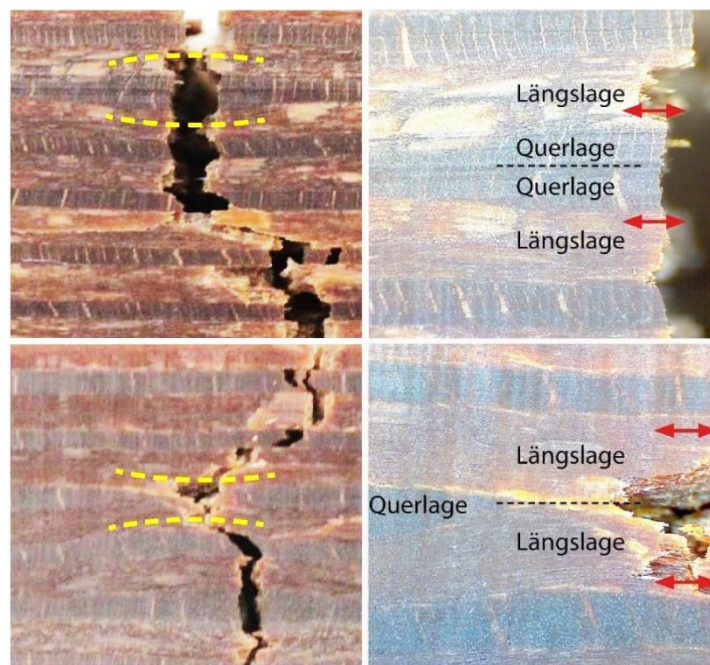


Abbildung 35: Typen von Furnierstößen

Lagen bei einer Zugprüfung innerhalb des Prüfkörpers Furnierstöße vor, so traten die Zugbrüche ausschließlich im Bereich der Stöße auf (Abbildung 35).

3.2.4 KP – Einsatzgebiete

KP wird seit den 20-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts hergestellt. Zu jener Zeit wurden unter anderem Flugzeugpropeller aus KP gefertigt. Gegenwärtig findet KP aufgrund seines vergleichsweise hohen elektrischen Isolationsvermögens vorwiegend Anwendung im Transformatorenbau. Aufgrund des vergleichsweise hohen thermischen Isolationsvermögens wird KP beim Bau von Flüssiggastankern eingesetzt. Weitere Einsatzbereiche finden sich „... im Maschinenbau für Drückwerkzeuge, Stanzwerkzeuge, Schablonen, Rollen, Spulen, Lager, Zahnräder, Gießmodelle u. a., in Kläranlagen als Überlaufschwelen und im Transportbehälterbau z. B. für Boden- und Seitenteile“ (Ehlbeck & Hättich, 1986).

KP wird für Spezialanwendungen z. B. für kugelsichere Türen ⁶, Unterboden im Motorsport, etc. verwendet. Darüber hinaus können stabförmige Verbindungsmittel als Nägel oder Gewindestangen aus KP hergestellt werden.

3.3 Einfluss der Materialeigenschaften auf den Klebverbund

Die Festigkeit eines Klebverbundes wird durch eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter beeinflusst. Zu diesen zählen unter anderem die Art der Klebung (punktuell, linienförmig, flächig), die geometrische Ausbildung der Klebfuge (stumpfer Stoß, Überlappung, Schäftung, Keilzinkenverbindung), die Klebstoffart und deren mechanischen Eigenschaften. Des Weiteren die Art der zu verklebenden Materialien und deren mechanische Eigenschaften, die Oberflächenbeschaffenheit der Fügeteilpartner, der Steifigkeitsunterschied zwischen den Fügeteilpartnern sowie der Steifigkeitsunterschied zwischen Fügeteilpartnern und dem Klebstoff, die Temperatur sowie diverse Prozessparameter.

Werden Materialien mit ungleichen Eigenschaften miteinander verklebt, treten im Vergleich zu einer Klebung zwischen gleichen Fügeteilpartnern, zusätzliche Spannungsspitzen aufgrund von Steifigkeitsunterschieden der Materialien auf. In einer Klebverbindung zwischen zwei Materialien mit unterschiedlichen thermischen und hygroskopischen Eigenschaften, werden bei einer Veränderung der Temperatur sowie bei einer Veränderung der Materialfeuchte gegenüber den Randbedingungen unter den die Klebung durchgeführt wurde, thermische Spannungen als auch Schwind- und Quellspannungen hervorgerufen. Thermische Spannungen, Schwind- und Quellspannungen als auch Spannungen aufgrund unterschiedlicher Materialsteifigkeiten, überlagern sich mit den Spannungen, die unter mechanischer Beanspruchung auf die Klebfuge wirken und führen zu einem vorzeitigen Versagen des Klebverbundes.

In Klebverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP werden zwei unterschiedliche Materialien mit einander verklebt. Neben unterschiedlichen Steifigkeitseigenschaften unterscheiden sich Holz und KP im thermischen als auch im hygroskopischen Verhalten. Im baupraktisch relevanten Temperaturspektrum ist der Einfluss der Temperatur auf die mechanischen Eigenschaften sowohl von Holz als auch von KP vergleichsweise gering. Allerdings ist der Einfluss der Feuchtigkeit auf natives Holz groß, während er auf KP praktisch unbedeutend ist. Das hat zur Folge, dass natives Holz durch Schwinden und durch Quellen auf Veränderungen der Luftfeuchte reagiert, während KP weitgehend formstabil bleibt.

⁶ Blomberg Delignit; www.delignit.com (Beschuss-Widerstandsklassen M1 bis M5)

3.3.1 Hygroskopisches Verhalten von Fichtenholz und von KP ⁷

Ein Faktor, der sich negativ auf die Festigkeit der Klebfuge auswirkt, ist das unterschiedliche Schwind- und Quellverhalten der Fügeteilpartner. Natives Holz reagiert auf Veränderungen der Holzfeuchte mit einer Veränderung der Dimension in alle drei Raumrichtungen. Bei KP sind die wasserleitenden Bereiche weitgehend mit Kunstharz imprägniert, sodass die Wasseraufnahme und Wasserabgabe und damit auch das Schwinden und das Quellen behindert wird.

Die Fachliteratur gibt wenig Auskunft zur Wasseraufnahmefähigkeit von KP. Haller et al. (2015) haben für KP verschiedener Tränkungsgrade und für Fichte die Wasseraufnahmefähigkeit darrtrockener Prüfkörper über einen Zeitraum von 1.000 – 1.700 Stunden bei vollständiger Lagerung unter Wasser wie auch bei Lagerung im Klimaschrank (35 °C, 98 % relative Luftfeuchte), dokumentiert: Teilgetränktes KP zeigte, sowohl bei Lagerung im Wasserbad als auch bei Lagerung im Klimaschrank, eine ähnliche Feuchtezunahme wie native Fichte. Deutliche Unterschiede zeigten sich jedoch bei der Quellung. Für beide Lagerungstypen lag das Quellmaß von teilgetränktem KP deutlich oberhalb des Quellmaßes für native Fichte. Für vollgetränktes KP verlief die Wasseraufnahme im Vergleich zur nativen Fichte erheblich langsamer. Die Volumenzunahme betrug je nach Qualität des KPs zwischen 5 % und 10 % im Klimaschrank und 5 - 25 % bei Wasserlagerung.

Innerhalb der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihe wurde das Trocknungsverhalten wie auch das Auffeuchteverhalten darrtrockener Querschnitte unter Normalklima und unter Wasserlagerung an Prüfkörpern aus Fichtenholz, Buchenholz und KP untersucht. Darüber hinaus wurde auch das Quellverhalten der drei genannten Materialien erforscht.

3.3.1.1 Trocknungsverhalten

Im Vergleich zu nativem Fichtenholz und nativem Buchenholz trocknet KP deutlich langsamer. Während der darrtrockene Zustand von Fichtenholz und von Buchenholz nach ca. 8 Stunden erreicht wurde, dauerte die Trocknung von KP bis zum darrtrockenen Zustand fast 1000 Stunden (vgl. Abbildung 213, im Anhang, S. A-11)

3.3.1.2 Auffeuchteverhalten von KP, Buche und Fichte bei vollständiger Lagerung unter Wasser (kapillare Wasseraufnahme)

Im Vergleich zu nativem Holz zeigte KP eine deutlich langsamere und deutlich geringere Wasseraufnahme (vgl. Abbildung 36, S. 43). Eine differenzierte Betrachtung der Einzelprüfkörper aus KP zeigte weiterhin, dass KP mit 50 % Längslage und 50 % Querlage eine etwa doppelt so schnelle und bis zu doppelt so starke Wasseraufnahme gegenüber den KP-Prüfkörpern mit 67 % Längslage und 33 % Querlage wie auch den KP-Prüfkörpern mit 33 % Längslage und 67 % Querlage aufweist (vgl. Abbildung 37), was sich zunächst nicht holzanatomisch erklären lässt. Nach ca. 3.000 Stunden waren die Buchenholzquerschnitte wassergesättigt und es konnte keine weitere Wasseraufnahme verzeichnet werden. Nach

⁷ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.1.1, S. A-10

5.000 Stunden waren die Fichtenholzquerschnitte wassergesättigt (vgl. Abbildung 36). Die Wassersättigung von KP wurde bei ca. 3.000 Stunden für das KP BE 335-1 50 % / 50 % und nach ca. 4.300 Stunden für das KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q sowie für das KP BE 335-1 33 % L / 67 % Q erreicht (vgl. Abbildung 37).

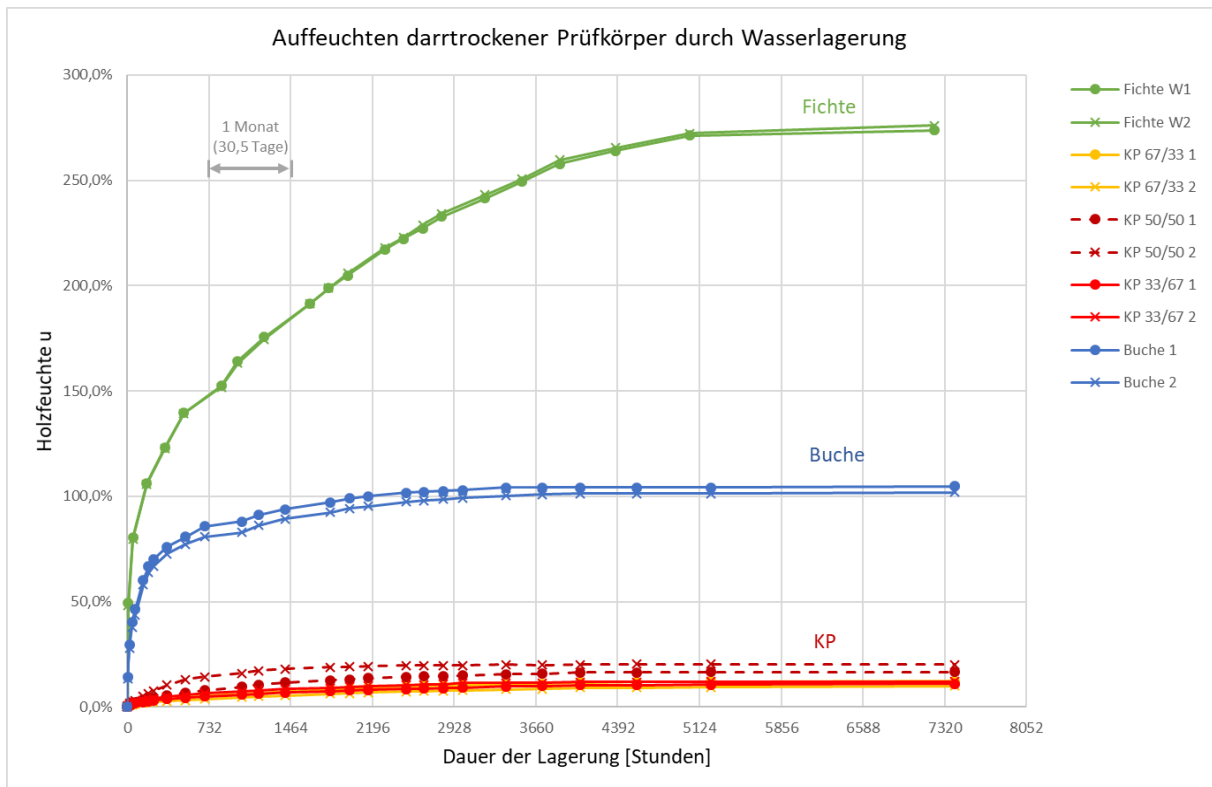


Abbildung 36: Auffeuchtung von KP, Fichte und Buche bei vollständiger Lagerung unter Wasser

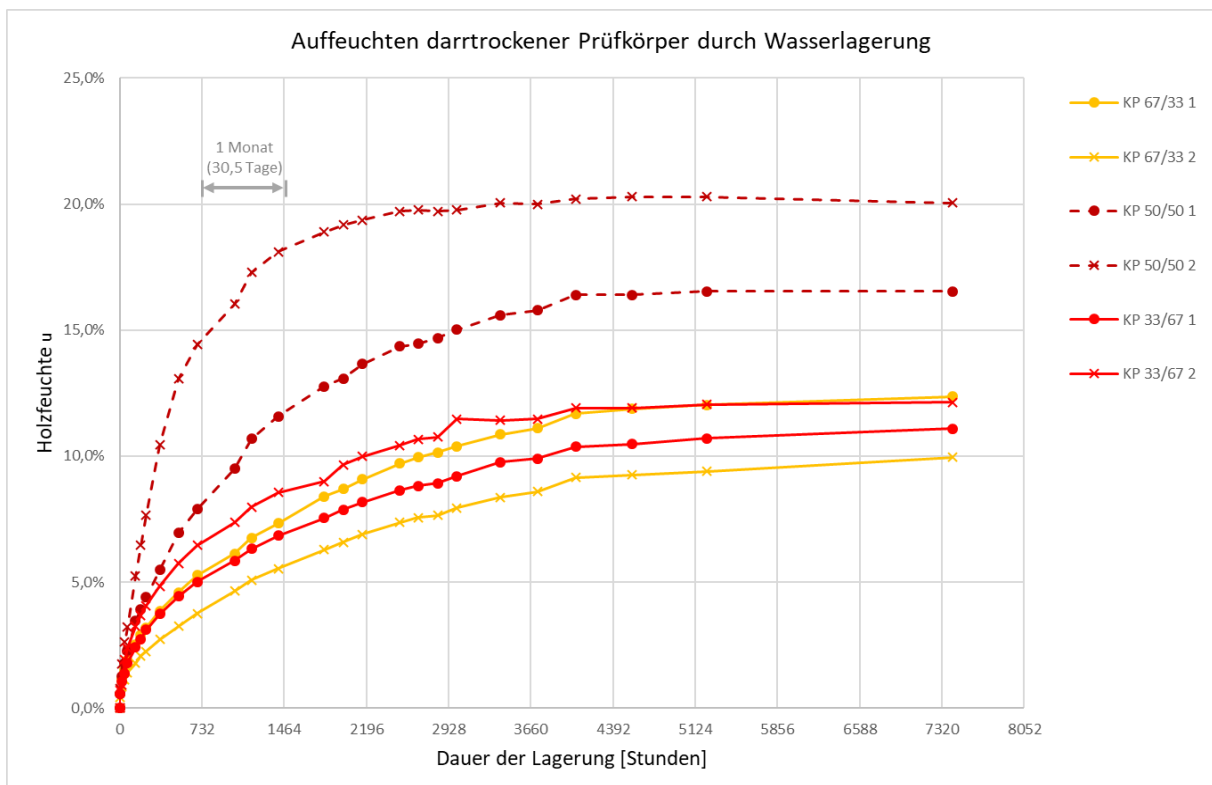


Abbildung 37: Auffeuchtung von KP bei vollständiger Lagerung unter Wasser

3.3.1.3 Holzfeuchte und Quellung

Für Buche betrug die Volumenzunahme nach wenigen Tagen ca. 23 %, für Fichte ca. 12 %. Während KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q und KP BE 335-1 33 % L / 67 % Q nach 5226 Stunden eine Volumenzunahme von 8 % aufwiesen, so lag die Volumenzunahme bei KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q im gleichen Zeitraum bei mehr als 14 % und damit etwas höher als die Volumenzunahme bei Fichte (vgl. Abbildung 38) .

Für KP konnte quer zur Plattenebene ein differentielles Quellmaß von 0,67 % / 1[% u] im Bereich von 0 % - 20 % Holzfeuchte ermittelt werden (vgl. Abbildung 39, S. 45). Damit liegt es deutlich oberhalb des in der Fachliteratur (Halász & Scheer, 1996, zitiert nach Niemz & Sonderegger, 2017, S. 101 f.) angegebenen differentiellen Quellmaßes für Fichte in Tangentialrichtung (0,36 % / 1[% u]) und Buche (0,41 % / 1[% u]) in Tangentialrichtung. Auch das maximale Quellmaß von KP quer zur Plattenebene liegt mit 13 % deutlich höher als das innerhalb der Versuchsreihe gemessene maximale Quellmaß in Tangentialrichtung für Fichte (7 %) und Buche (11,5 %) (vgl. Abbildung 40, S. 45). Innerhalb der Plattenebenen konnte kein differentielles Quellmaß ermittelt werden, da hier die Quellungen zu gering waren. Das maximale Quellmaß betrug gerade einmal 1,0 % (vgl. Abbildung 39, S. 45).

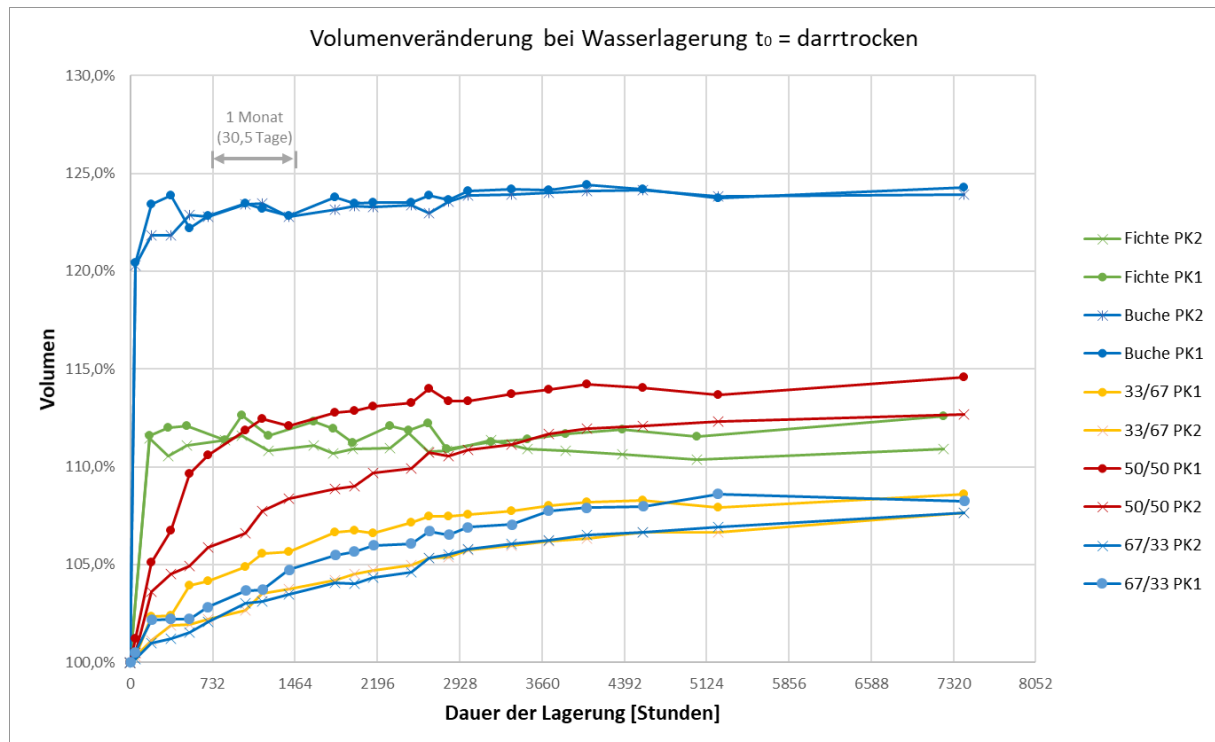


Abbildung 38: Volumenzunahme bei Auffeuchtung darrtrockener Prüfkörper aus Fichte, Buche und KP

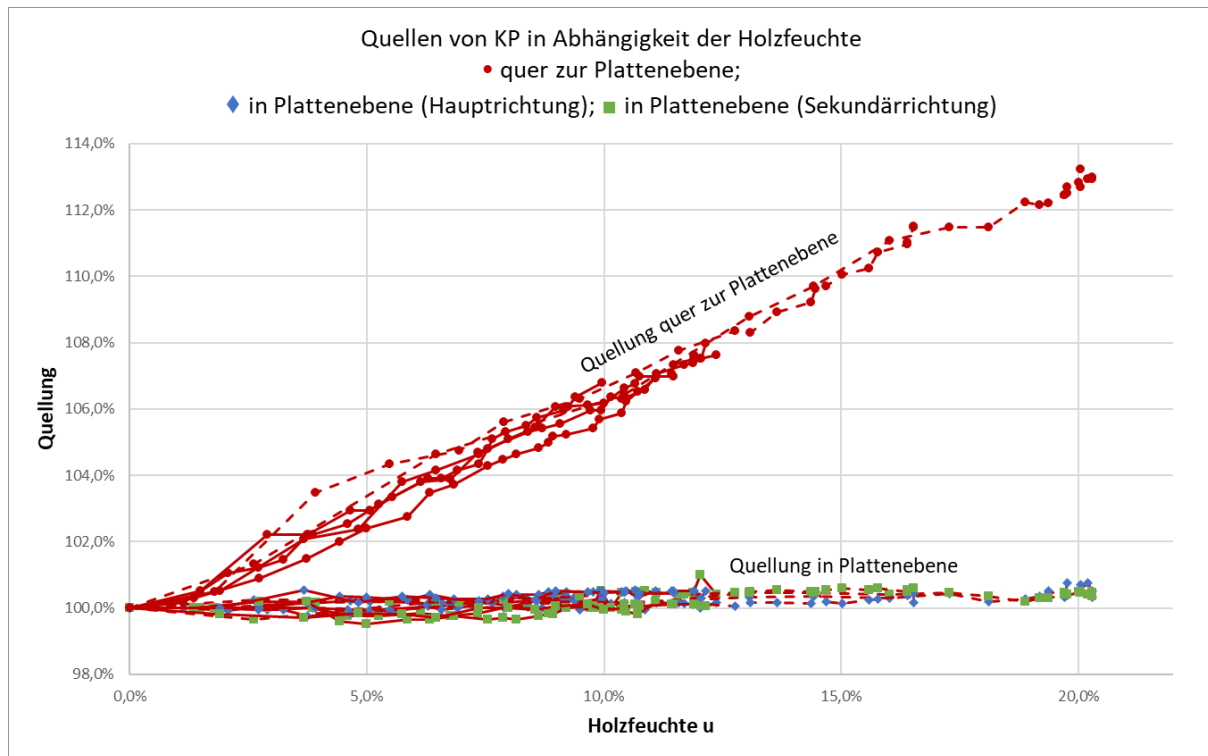


Abbildung 39: Quellmaß von KP in Abhängigkeit der Raumrichtungen (gestrichelte Linien = KP BE 335-1 50 % / 50 %)

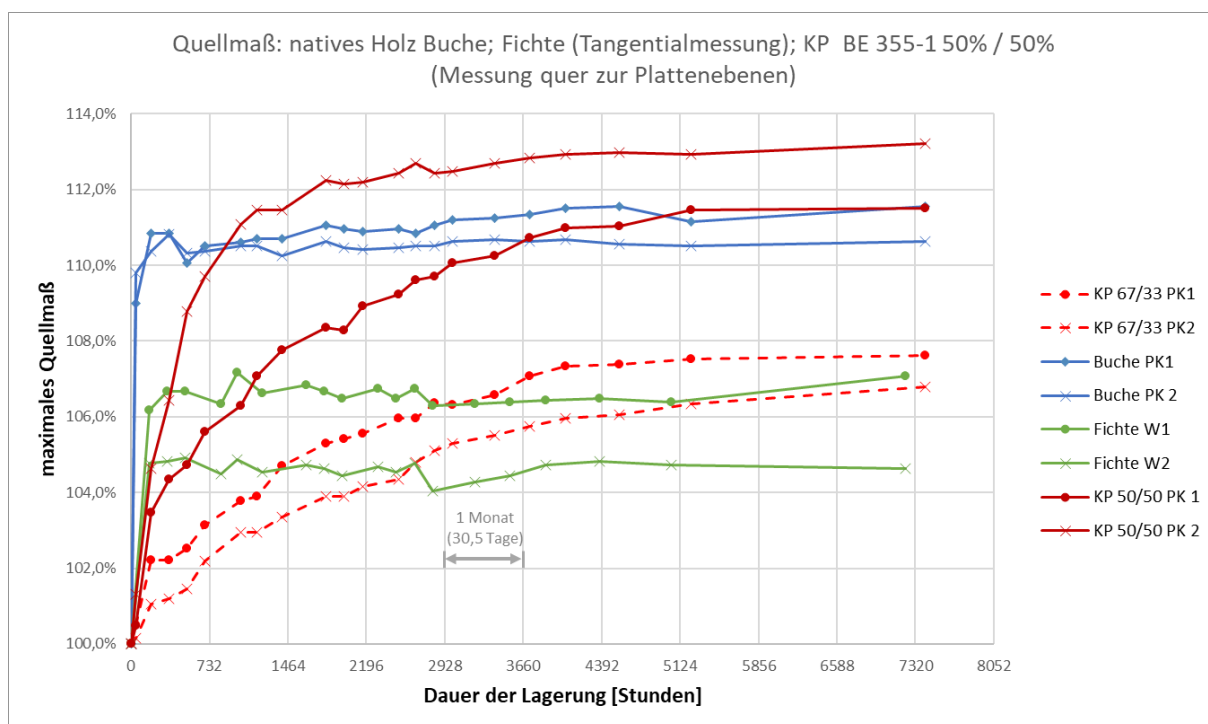


Abbildung 40: Quellmaß in Abhängigkeit der Zeit bei Buche, Fichte, KP BE 335-1 50 % / 50 %

3.3.1.4 Auffeuchtverhalten von KP, Buche und Fichte bei Lagerung unter Normalklima (Adsorption)

Bei Fichte stellte sich die Holzausgleichsfeuchte nach ca. 48 Stunden, bei Buche nach ca. 144 Stunden ein. Für KP war selbst nach 7.414 Stunden immer noch eine Zunahme der Holzfeuchte festzustellen.

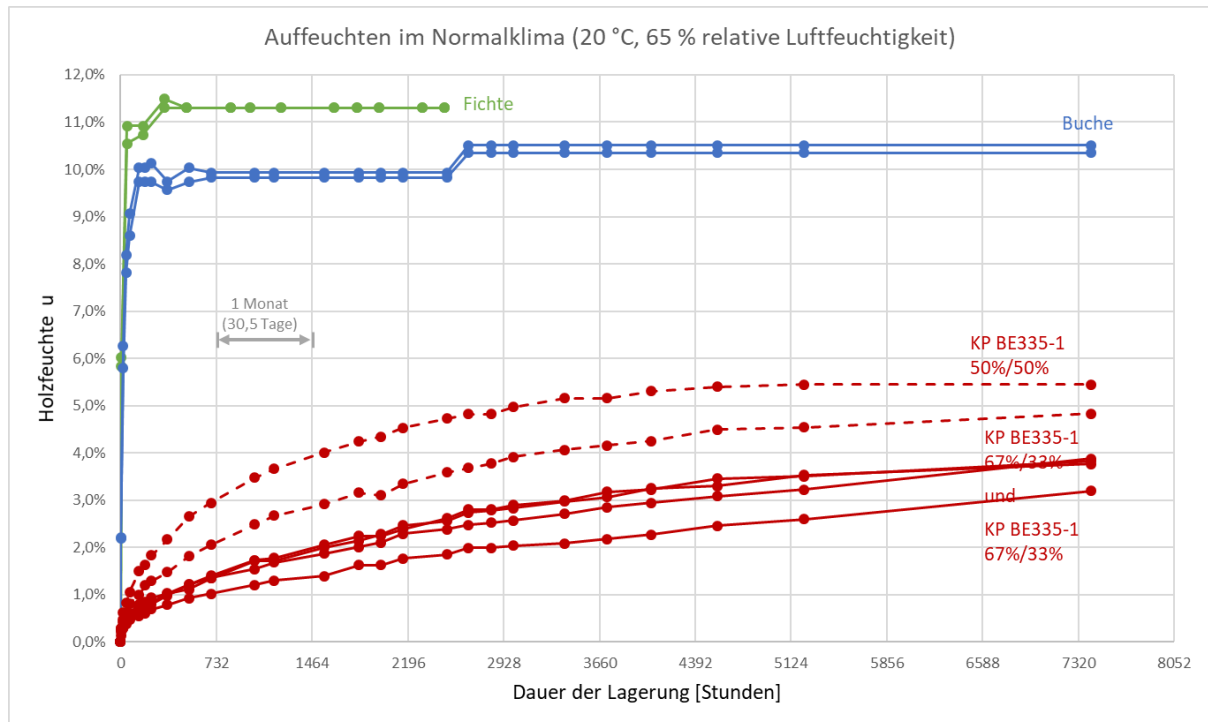


Abbildung 41: Aufweichen darrtrockener Prüfkörper im Normalklima

Dabei zeigte sich, dass - wie bei der Wasserlagerung - die Prüfkörper mit einer Furnieranordnung von 50 % Längslage und 50 % Querlage am schnellsten aufweichteten, während die Prüfkörper mit einer Furnieranordnung von 67 % Längslage und 33 % Querlage wie auch die Prüfkörper mit einer Furnieranordnung von 33 % Längslage und 67 % Querlage deutlich langsamer Umgebungsfeuchte aufnahmen. KP zeigte demnach sowohl bei der Desorption als auch bei der Adsorption, ein deutlich trägeres Verhalten als natives Holz.

3.3.1.4.1 Differenzierte Betrachtung der Wasseraufnahme in die drei Raumrichtungen

Bei nativem Holz zeigte sich eine klare Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Wasseraufnahme von den drei Raumrichtungen. Am schnellsten wurde das Wasser über die Axialflächen aufgenommen, was nicht verwunderlich ist, liegt diese doch in Richtung der natürlichen Wasserleitbahn des Baumes. Weiterhin unterscheidet sich die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme über eine Tangential- oder Radialfläche. Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme war bei Tangentialflächen größer als bei Radialflächen (vgl. Abbildung 42, S. 47). Auch hier lässt sich die höhere Aufnahmegeschwindigkeit der Tangentialflächen durch die Holzanatomie erklären, neben den Hoftüpfeln befinden sich in Tangentialebene Holzstrahlen, die eine horizontale Wasser- und Nährstoffverteilung im lebenden Baumstamm ermöglichen. Diese liegen in Radialebene nicht vor. Auch bei KP konnten Unterschiede bei der Wasseraufnahmegeschwindigkeit bei der Betrachtung der drei Raumrichtungen dokumentiert werden. Es

wurde die Aufnahmegeschwindigkeit innerhalb der Plattenebene wie auch quer zur Plattenebene untersucht. In Plattenebene zeigte sich eine höhere Aufnahmegeschwindigkeit bei höherem Anteil an Furnieren, die in Axialrichtung zur Betrachtungsebene orientiert waren (grün = 67 % Axialfurnier). Quer zur Plattenebene, respektive in Tangentialrichtung der Furniere war die Geschwindigkeit am geringsten. Wie bei der Wasserlagerung und der Lagerung im Klimaschrank (Auffeuchtung über 6 Flächen) zeigte sich auch bei der Lagerung im Klimaschrank unter Betrachtung der Auffeuchtung über eine Einzelfläche, dass KP BE335-1 (50 % L / 50 % Q) am schnellsten aufzufeuichten war (vgl. Abbildung 43).

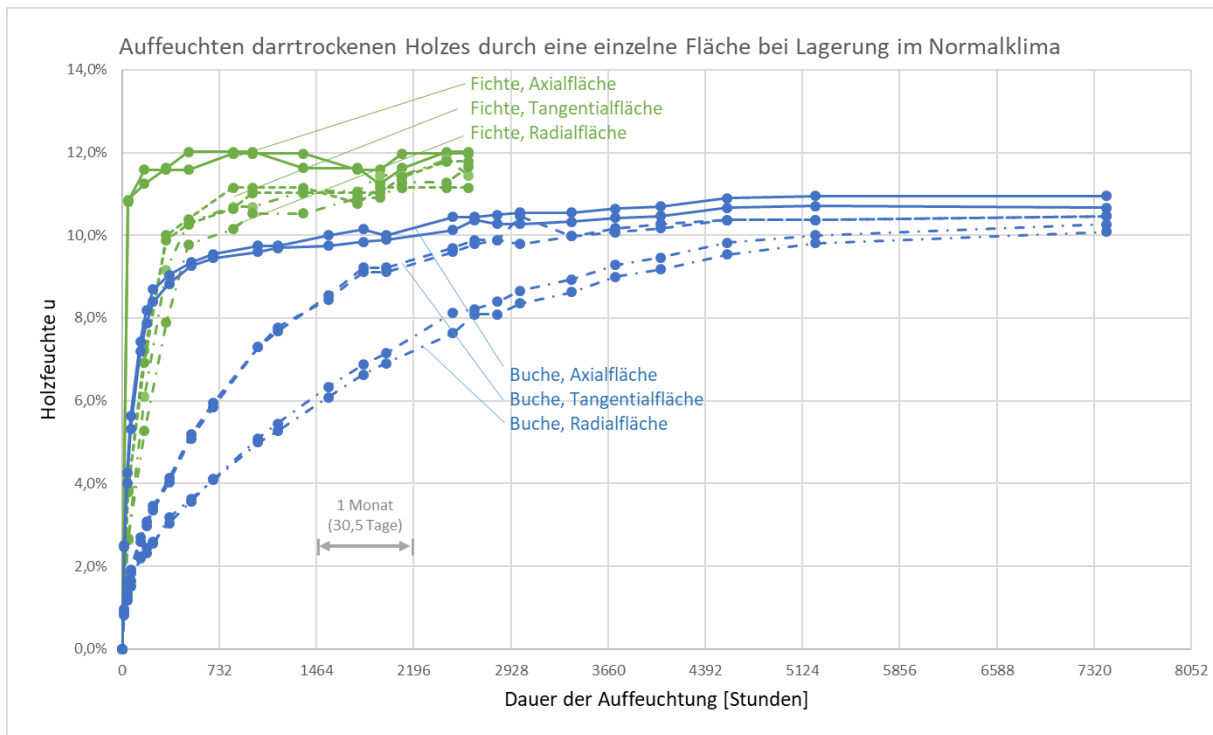


Abbildung 42: Wasseraufnahme über Axial-, Radial- und Tangentialfläche bei nativem Fichten- und Buchenholz

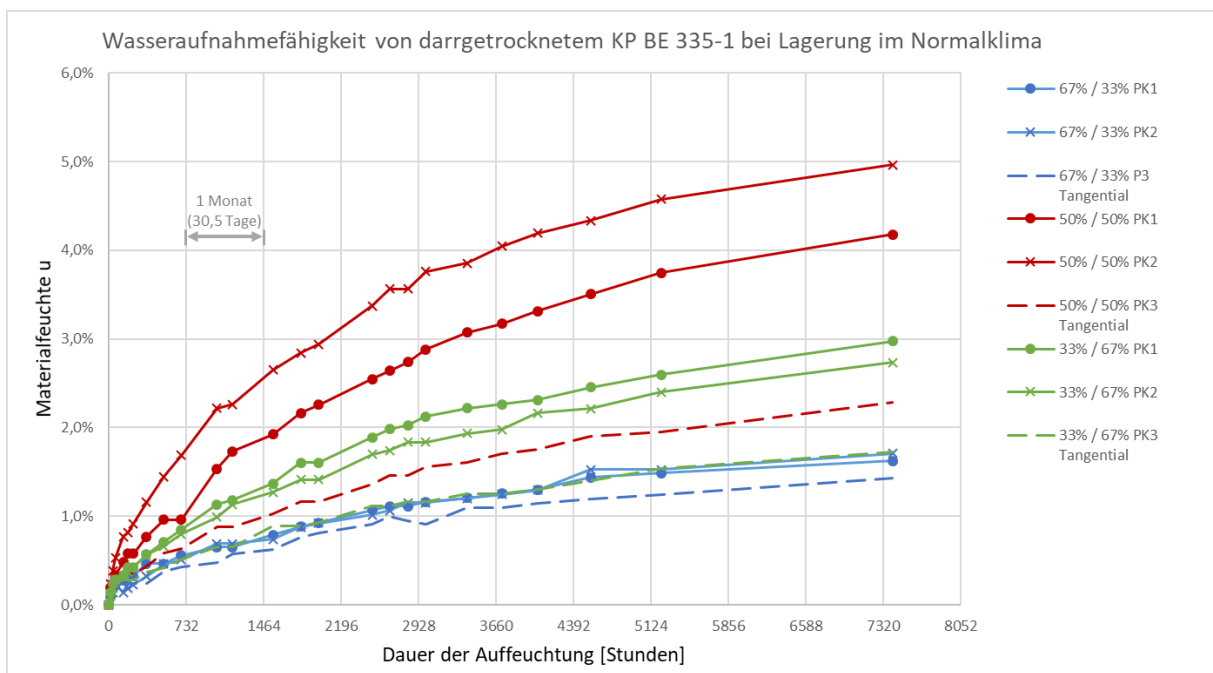


Abbildung 43: Wasseraufnahme über Axial-, Radial- und Tangentialfläche bei KP BE 335-1

Verglichen mit nativem Holz verläuft die Wasseraufnahme von KP durch Adsorption im gleichen Betrachtungszeitraum erheblich langsamer. Bei nativem Holz hat eine Differenzierung in Axial-, Radial- und Tangentialrichtung, bei KP nur innerhalb der Plattenebene und quer zu dieser zu erfolgen. Bei gleichem Anteil an Längs- und Querfurnier, ist das Wasseraufnahmeverhalten in X- und in Y-Richtung der Platte gleich, sind die Anteile unterschiedlich, muss weiterhin in X- und in Y-Richtung differenziert werden (s. Abbildung 43, S. 47).

3.3.1.4.2 Auswirkung des Wasseraufnahmeverhaltens bei der Anwendung im konstruktiven Ingenieurbau

Für Fichtenholz schwankt im baupraktischen Bereich (Gebrauchsklasse 0 – Gebrauchsklasse 3.1) die Holzfeuchte zwischen 5 % (Winter: Innenraum, beheizt) und ~ 20 % (Stütze Außenbereich). Bei einer Flächenverklebung zwischen Fichte und KP kann von einer tangentialen Quellung von 0,36 % / 1 % [u] und damit einer Gesamtquellung von 5,4 % bei einer Steigerung der Holzfeuchte von 5 % auf 20 % ausgegangen werden.

Bei einer Verklebung zweier Holzquerschnitte mit gleichem Schwindverhalten führt das Trocknen zu einer Leistungssteigerung der Klebfuge. Zum einen steigen die Elastizitätsmoduln der beiden Fügeteile, was zu einer besseren Spannungsverteilung in der Klebfuge führt, zum anderen wird durch das Schwinden des Holzes die Klebfuge auf Druck vorgespannt. (Niemz & Allenspach, 2009)

Unter einer Zugscherbeanspruchung reduzieren sich die Scherspannungen um den Anteil dieser Vorspannung; infolge dessen steigt die Leistungsfähigkeit der Klebverbindung an. Werden jedoch Querschnitte mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln verklebt, so kann das unterschiedliche Schwind- und Quellverhalten zum vorzeitigen Bruch der Klebfuge führen.

3.3.1.5 Kombination von nativer Fichte und KP

Bei vollständiger Imprägnierung reagiert KP nur gering und äußerst langsam auf Veränderungen der Umgebungsfeuchte, während natives Holz in Abhängigkeit des Verhältnisses aus Oberfläche und Querschnittsvolumen mehr oder weniger schnell seine Holzausgleichsfeuchte erreicht hat. Auf schnelle Feuchteveränderungen reagiert KP praktisch nicht. Aus diesem Grund kann von der nachfolgend beschriebenen Schwind- und Quellbeanspruchung bei einer flächigen Verklebung zwischen nativer Fichte und KP ausgegangen werden:

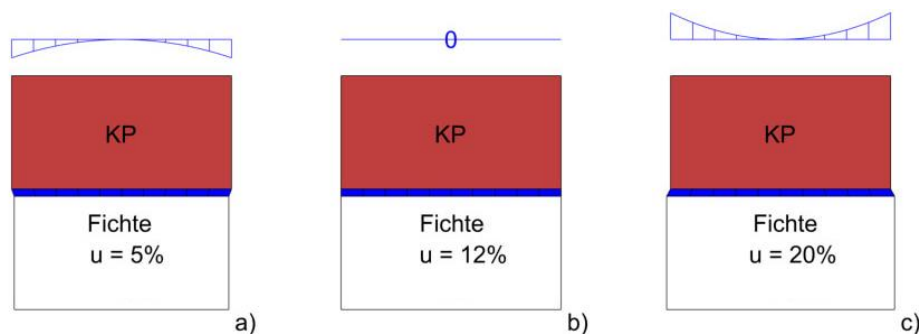


Abbildung 44: Qualitative Belastung als Scherspannung auf die Klebfuge infolge unterschiedlichem Schwind- und Quellverhaltens bei einer Flächenverklebung zwischen Fichte und KP. Klebung bei 12 % Holzfeuchte

Ein Verbundquerschnitt aus Fichte und KP sei bei $u_{\text{Fichte}} = 12\%$ hergestellt worden. Bei einer Lagerung unter Normalklima wird die Klebfuge, ohne dass eine äußere mechanische Beanspruchung am Verbundquerschnitt vorliegt, nicht beansprucht. Der Verbundquerschnitt soll nun gedanklich aufgefuechtet, bzw. heruntergetrocknet werden. Aufgrund der deutlich schnelleren Wasseraufnahme und Wasserabgabe bei Fichtenholz wird sich beim Erreichen der Holzausgleichsfeuchte im Fichtenquerschnitt noch keine Querschnittsänderung im KP-Anteil vollzogen haben.

Infolge des Schwindens wird die Klebfläche auf eine Schwindsscherung beansprucht. Die Scherwinkel sind an den Kanten am größten und im Verbundflächenschwerpunkt gleich 0. Die Klebfuge wird demnach an den Kanten maximal beansprucht. Bei Erreichen der Scherfestigkeit der Klebfuge kommt es zum Versagen ebendieser (vgl. Abbildung 44, S. 48). Gleiche Beanspruchungen der Klebfuge treten ebenfalls beim Quellen auf.

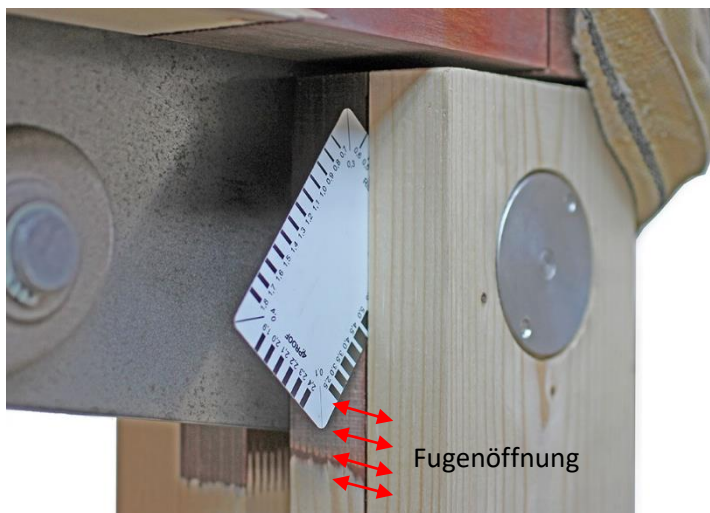


Abbildung 45: Delamination der Klebfuge infolge des Holzschwindens

Diese Problematik konnte an Verbundquerschnitten (6 cm / 12 cm) aus Fichte und KP beobachtet werden, die unter Normalklima hergestellt worden sind und anschließend während der Lagerung im beheizten Innenraum auf $u \sim 5\%$ heruntergetrocknet sind. Die infolge des Schwindens aufgetretenen Schwindspannungen haben zum Versagen der Resorzinharzklebfuge an allen Verbundquerschnitten der Liefercharge geführt (vgl. Abbildung 45).

Aus diesem Grund wird von einer Flächenverklebung nach Abbildung 21 (2), (3), (4), S. 25 Abstand genommen.

3.4 Materialauswahl für die Stabverstärkung

Für die Verstärkung von Stabenden muss KP zwei wesentliche Aufgaben erfüllen:

- 1) Um möglichst genaue und maßhaltige Bohrungen zu erreichen, muss der Werkstoff unempfindlich gegenüber Luftfeuchteveränderungen sein. Da teilgetränktes KP eine Wasseraufnahmefähigkeit ähnlich die der Fichte zeigt (Putzger (2), 2011, S. 89) und mit erhöhter Bauteilfeuchte Quellerscheinungen eintreten, ist eine Verwendung von teilgetränktem KP ausgeschlossen. In Betracht gezogen werden kann daher ausschließlich vollständig durchtränktes KP. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher vollständig durchtränktes KP der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH und Co. KG verwendet.
- 2) Die Festigkeit des KPs am Stabende muss so hoch sein, dass unter den beschriebenen Querschnittschwächungen (vgl. Kap. 2.3) im Anschlussbereich die volle Tragfähigkeit des ungeschwächten Stabbruttoquerschnitts ausgeschöpft werden kann.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken* wurden für zwei ausgewählte KP-Qualitäten an je 5 Prüfkörpern Kennwerte für Biege-, Zug- und Druckfestigkeiten sowie Steifigkeiten längs und quer der Faser ermittelt. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Tabelle 5: Mechanische Kennwerte für die KP-Qualitäten BE335-1 und B340 ⁸

je n = 5	Kennwerte nach DIN EN 1058:2010-04	Anteil Längslagen	Anteil Querslagen	Biegefestigkeit	Biege-E-Modul	Biegefestigkeit	Biege-E-Modul	Druckfestigkeit	Druckfestigkeit	Zugfestigkeit	Zugfestigkeit
				senkrecht	senkrecht	parallel	parallel	senkrecht	parallel	längs	quer
B340	mittel	50	50	150,4	13.557	137,5	13.394	284,5	135,3	105,4	140,1
	char.			133,8		123,7		257,4	125,6	70,4	118,0
	mittel	67	33	173,3	16.622	161,5	15.609	255,6	145,0	122,1	111,4
	char.			153,0		143,0		248,3	137,6	99,7	103,3
	mittel	80	20	224,9	20.310	207,6	19.750	186,6	154,1	185,6	54,0
	char.			205,4		192,0		162,4	149,2	144,4	49,0
B335-1	mittel	50	50	192,3	18.160	146,7	16.804	311,3	201,9	106,3	123,6
	char.			174,4		130,3		273,8	189,5	75,2	96,9
	mittel	67	33	222,8	20.987	185,7	20.430	250,0	210,0	161,7	56,4
	char.			208,7		167,9		230,0	201,9	146,8	40,6
	mittel	80	20	242,9	21.390	204,0	21.722	215,1	210,1	197,4	37,0
	char.			228,3		183,8		202,1	200,3	171,5	26,5

Die Kennwerte wurden an kleinen, fehlerfreien Prüfkörperquerschnitten ermittelt. Die Abmessungen betrugen:

Zugversuch: a = b = 10 mm

Druckversuch: a = b = h = 15 mm

Biegeversuch: a = b = 20 mm, l = 500 mm

Für die Anwendung von KP als Knotenverstärkung am auf Normalkraft beanspruchten Stabende sind Biegefestigkeiten sowie Querdruckfestigkeiten nur von geringer Bedeutung. Im Bereich der Krafteinleitung über den Bolzen in den Stab treten Längszug-, Längsdruck-, Querkzug- und Querdruckspannungen auf (vgl. Abbildung 10, Kap. 2.3).

Einen Überblick über die maßgeblichen mechanischen Auswahlkriterien gibt Abbildung 46, S. 51. Sie zeigt, dass mit Steigerung des Anteils der Längslagen eine Steigerung der Längszug- und Längsdruckfestigkeit und eine Abnahme der Querkzugfestigkeit einhergeht. Dabei führt eine Steigerung der Längslagen um ca. 30 % zu einer Zunahme der Längszugfestigkeit um ca. 85 %, bei gleichzeitiger Reduktion der Querkzugfestigkeit auf ca. 20 %. Die Druckfestigkeit zeigt eine weniger stark ausgeprägte Abhängigkeit von der Furnierorientierung, sie steigt im gleichen Betrachtungsbereich um ca. 5 % (bei KP BE 335-1).

⁸ Die Auswertung erfolgte auf Basis von im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH und Co. KG durchgeführten Versuchen.

Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von der Furnierausrichtung und des Aufbaus am Beispiel von KP BE 335-1 und KP B340

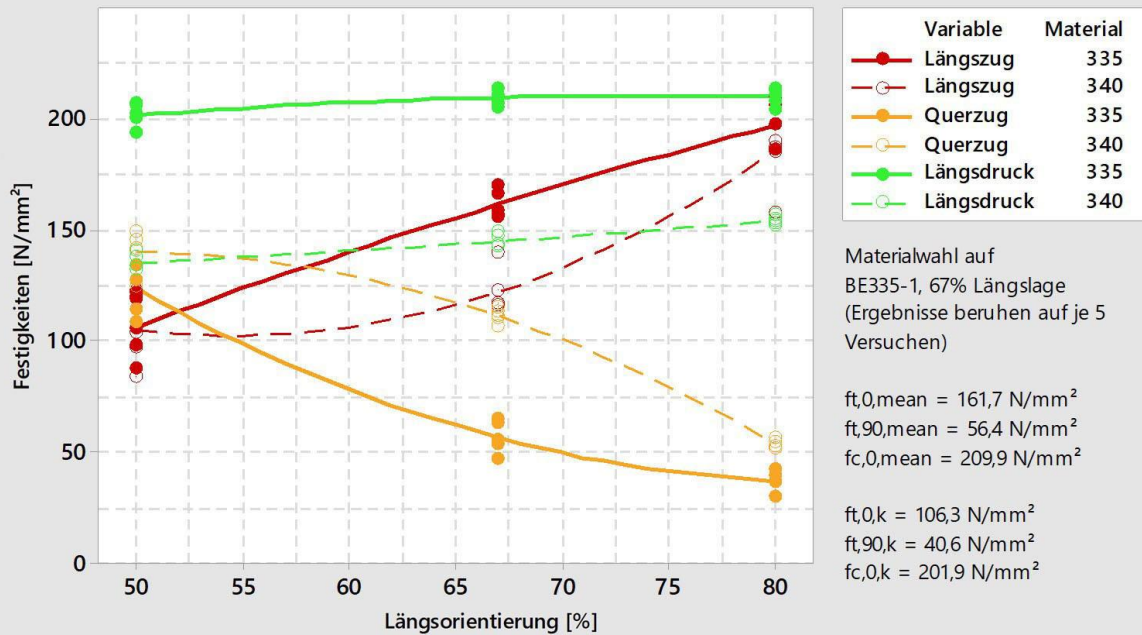


Abbildung 46: Darstellung ausgewählter mechanischer Eigenschaften auf Basis der für Tabelle 5 durchgeführten Untersuchungen

Aufgrund seiner vergleichsweise hohen Druckfestigkeit und Zugfestigkeit wurde KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q als Verstärkungsmaterial festgelegt.

3.5 Berechnung charakteristischer Kennwerte nach DIN EN 1058: 2010

Die Ermittlung der charakteristischen Festigkeitskennwerte und charakteristischen Steifigkeitskennwerte erfolgt für Holzwerkstoffe nach o. g. Norm. Die innerhalb dieser Arbeit ermittelten charakteristischen Kennwerte stellen die Kennwerte einer einzelnen Stichprobe dar.

Der charakteristische Wert ist der „Wert einer Materialeigenschaft, der als Quantil der Verteilung für diese Eigenschaft innerhalb der Grundgesamtheit dieses Materials definiert ist“ (DIN EN 1058, 2010, S. 5).

Zur Bestimmung charakteristischer Festigkeitskennwerte wird gemäß DIN EN 1058 (2010, S. 8) eine log-Normal-Verteilung der Kennwerte für die Berechnung zugrunde gelegt.

Charakteristische Festigkeitskennwerte einer Stichprobe berechnen sich als das 5%-Quantil mit:

$$m_k = m_{05} = \exp \left(\frac{1}{n} \times \sum_{j=1}^{j=n} \ln \bar{x}_j - k_s \times s_{\ln \bar{x}} \right)$$

Dabei ist

$$s_{\ln \bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=n} \ln \bar{x}_j^2 - \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \ln \bar{x}_j \times \sum_{j=1}^{j=n} \ln \bar{x}_j}{n}}{n-1}}$$

- m_k charakteristischer Wert von log-normal verteilten Prüfwerten
 \bar{x}_j Mittelwert der Stichproben
 $s_{\ln \bar{x}}$ Standard Abweichung zwischen Werten einer log-normal verteilten Eigenschaft
 $\bar{x}_j k_s$ statistischer Faktor für eine Grundgesamtheit mit unbekanntem Variationskoeffizient
 j Seriennummer ($j = 1 \dots n$)
 k charakteristischer Wert einer log-normal verteilten Eigenschaft
 05 charakteristischer 5%-Quantilwert einer log-normal verteilten Eigenschaft

Zur Bestimmung charakteristischer Steifigkeitskennwerte wird gemäß DIN EN 1058 (2010, S. 16) eine Normalverteilung der Kennwerte für die Berechnung zugrunde gelegt.

Charakteristische Steifigkeitskennwerte einer Stichprobe berechnen sich als das 50%-Quantil mit:

$$L^{\bar{x}_{50}} = \bar{x} - \frac{k_s \times s_{\bar{x}}}{\sqrt{n}}$$

Dabei ist

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{j=n} \bar{x}_j^2 - \frac{\sum_{j=1}^{j=n} \bar{x}_j \times \sum_{j=1}^{j=n} \bar{x}_j}{n}}{n-1}}$$

- $s_{\bar{x}}$ Standardabweichung einer normalverteilten Eigenschaft
 L bezogen auf eine untere Merkmalsgrenze
 \bar{x} bezogen auf normal verteilte Prüfkörper
 50 charakteristischer 50%-Quantilwert einer normal verteilten Eigenschaft

Für den statistischen Kennwert k_s werden die Zahlenwerte nach (Klöck, 2004), Tabelle 28, S. A-1 angesetzt.

Anmerkung:

In den innerhalb dieser Arbeit aufgeführten graphischen Darstellungen ist der Mittelwert der Festigkeit als arithmetisches Mittel der summierten Festigkeiten des jeweiligen Prüfkollektives aufgeführt.

3.6 Mechanische Untersuchungen an KP

3.6.1 Druckversuche an KP BE 335-1, Buche und Fichte ⁹

Zwecks Verifizierung der Festigkeitskennwerte unter Tabelle 5 wurden Druckversuche an KP BE 335-1 mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Furniere und in Richtung der Plattenebenen sowie an nativer Buche und an nativer Fichte in Richtung der Faser durchgeführt. Die Anzahl der Prüfkörper wurde auf jeweils $n = 10$ gesteigert. Die Prüfkörper wiesen folgende Abmessungen auf: 4 cm x 2 cm x 2 cm. Die Ergebnisse sind in Abbildung 47 aufgeführt.

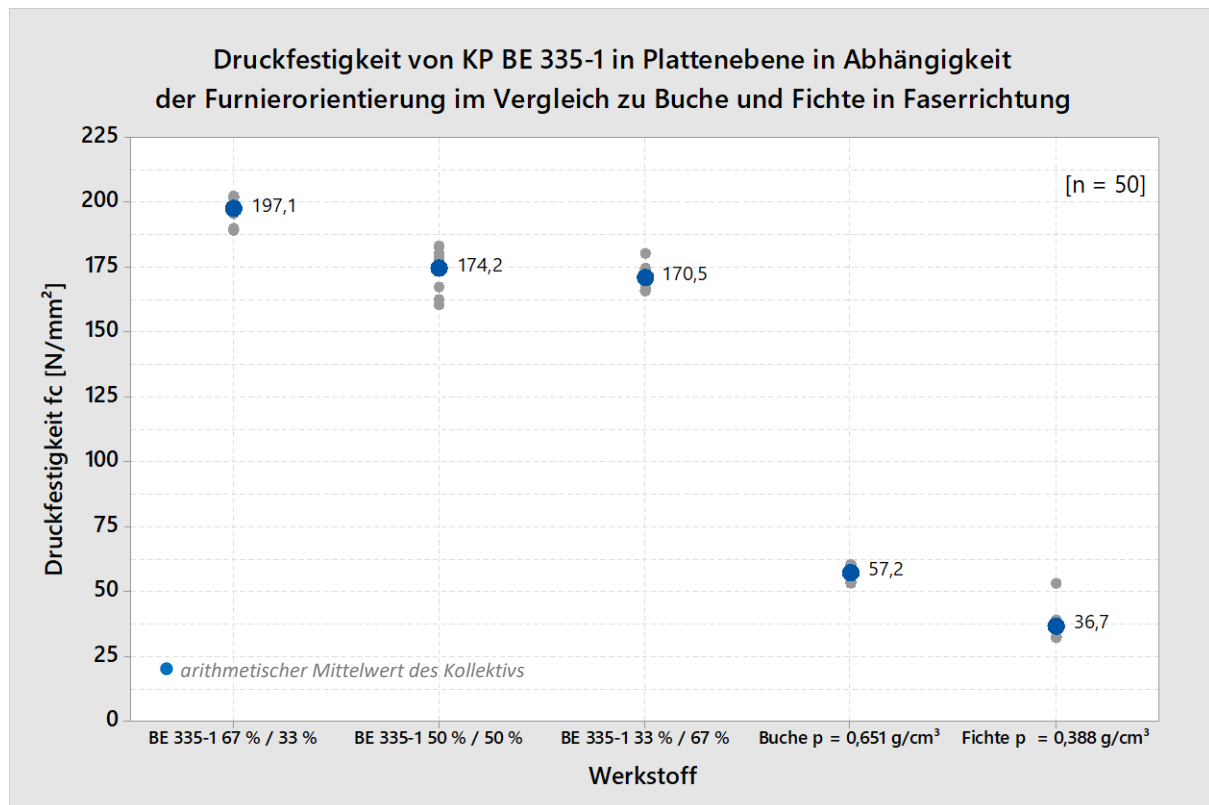


Abbildung 47: Vergleich der Druckfestigkeit von KP in Furnierrichtung, Buche und Fichte in Faserrichtung

3.6.1.1 Bruchbild



Abbildung 48: Druckversuch: Bruchbilder von KP (links), Buche (Mitte) und Fichte (rechts)

⁹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kapitel A-3.4.1, S. A-35

Der Bruch der KP-Prüfkörper tritt als Knicken der Längsfurnierlagen ein, kündigt sich im Gegensatz zu nativem Holz jedoch durch Veränderung der Steigung der Spannungs-Weg-Kurven an (vgl. Abbildung 49). Während an den nativen Hölzern die Höchstlast bei einer Dehnung von $e = 0,025$ erreicht wurde, wurde die Höchstlast an KP und je nach KP-Aufbau bei $e = 0,0625$ bis $e = 0,1$ gemessen.

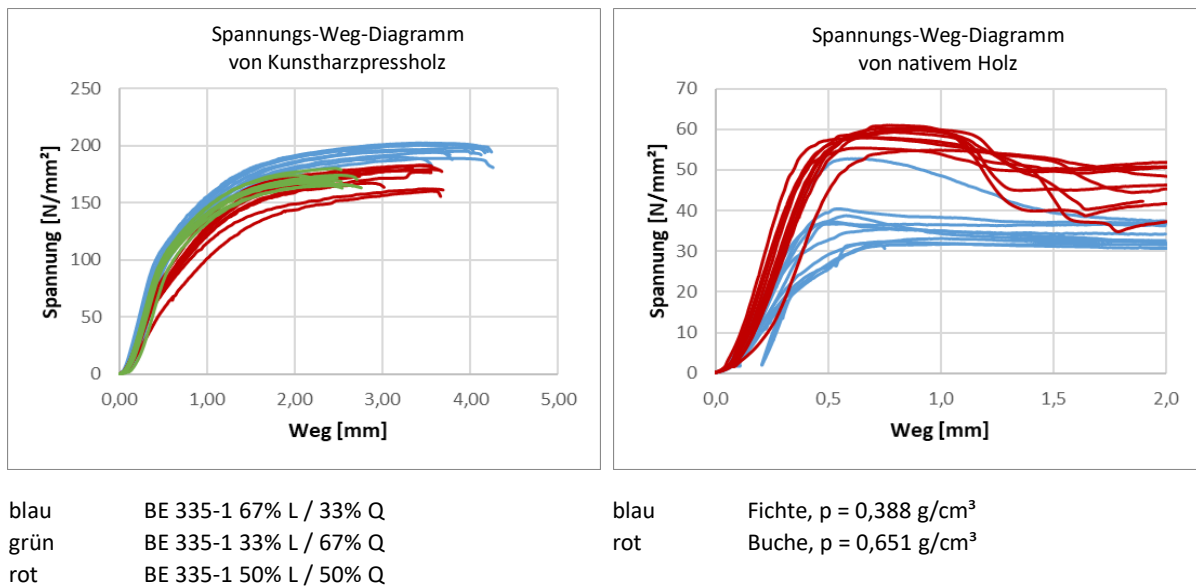


Abbildung 49: Vergleich der Spannungs-Weg-Kurven von KP (mit verschiedenem Aufbau) und nativem Holz (Fichte, Buche)

Die Druckfestigkeit von KP in Plattenebene hängt maßgeblich von der Orientierung der Furnierlagen ab. Mit steigendem Anteil von in Krafrichtung orientierter Furniere, steigt die Druckfestigkeit. Mit 197 N / mm² ist der Mittelwert der Druckfestigkeit von KP BE335-1 67 % L / 33 % Q ca. 3,5-fach höher als der Mittelwert der Druckfestigkeit nativer Buche und ca. 5-fach höher als der Mittelwert der Druckfestigkeit nativer Fichte.

Mit 1.400 kg/m³ liegt die Dichte von KP ca. 2,5 höher als die Dichte des im Druckversuch untersuchte Buchenholzes. Somit kann die Zunahme der Druckfestigkeit von KP bezogen auf das native Buchenholz um den Faktor 3,5 nicht ausschließlich über die Holzverdichtung erklärt werden. Die hohe Druckfestigkeit des Materials ist neben der Materialverdichtung auch auf die hohe Druckfestigkeit des Phenolharzes zurückzuführen¹⁰, das innerhalb der Zellwand und des Zelllumens gebunden ist.

Die deutlich höhere Dehnung bis zum Erreichen der Höchstlast ist darauf zurückzuführen, dass sich bei KP kein Knicken einzelner Faserbündel und ein anschließendes Aufspalten quer zur Faser einstellt, sondern der ganze Querschnitt ausknickt. Ein etwaiges Aufspalten tritt erst am Versuchsende ein.

3.6.2 Zugversuche an KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q, Einfluss von Schichtfehlern¹¹

Zwecks Verifizierung der Festigkeitskennwerte unter Tabelle 5 wurden Zugversuche an KP BE 335-1 67 % L / 33% Q durchgeführt. Bei diesem KP handelt es sich um ein gerichtetes Sperrholz mit einer Orientierung der Furnierlagen von 2/3 in Krafrichtung und von 1/3 quer zur Krafrichtung. Die Prüfanzahl

¹⁰ für Phenolharz PF 31 liegt die Druckfestigkeit beispielsweise bei 250 N/mm² (Hexion, 2019)

¹¹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kapitel A-3.2.1, S. A-17

wurde im Vergleich zu den Vorversuchen auf $n = 12$ gesteigert. Außerdem wurde der Einfluss von Schichtfehlern untersucht.

Aufgrund der geringeren Festigkeit und Steifigkeit versagen im Verbundquerschnitt mit zunehmender Belastungsgröße zunächst die Querlagen.

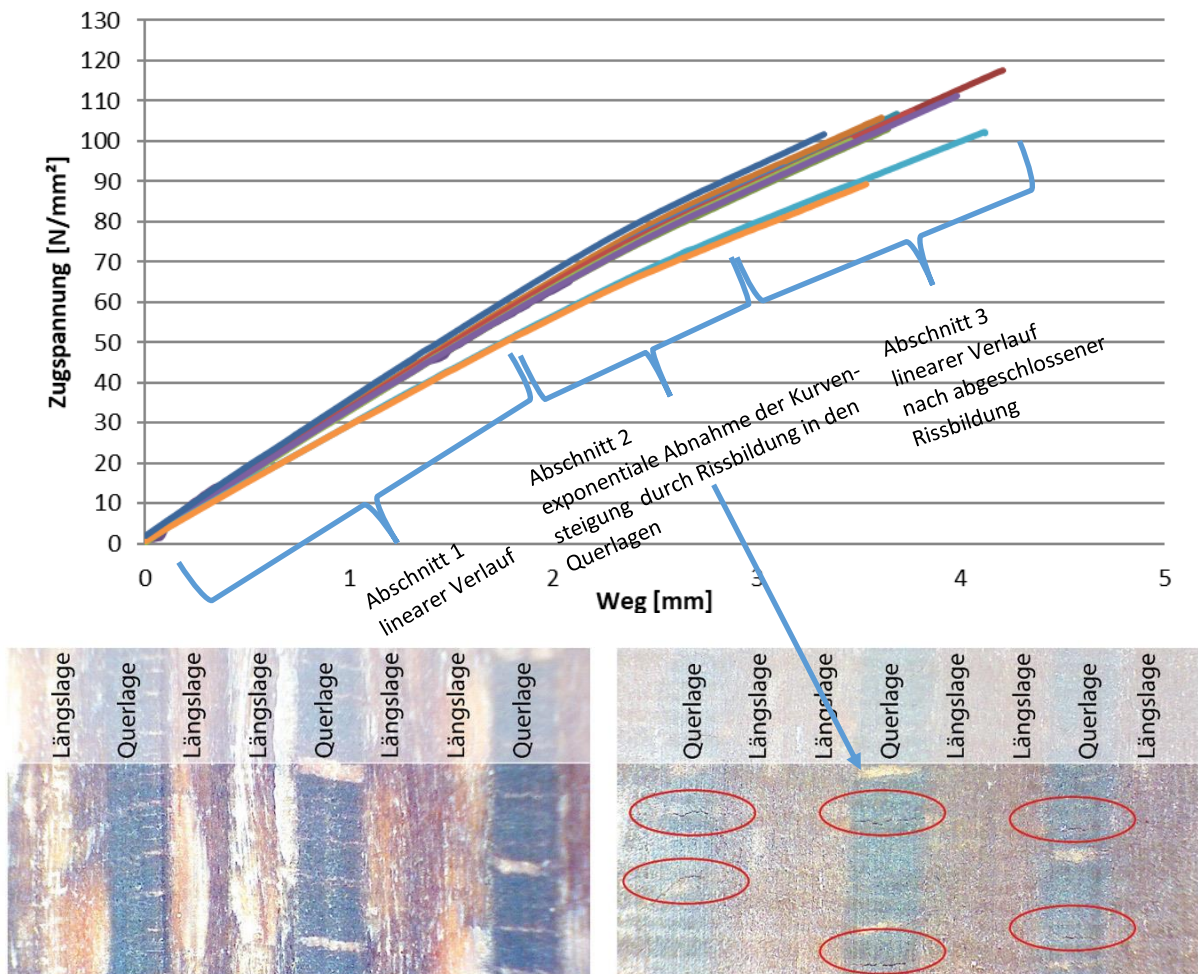


Abbildung 50: Oben: Spannungs-Weg-Diagramm von KP BE 335-1, 67 % Längslagen / 33 % Querlagen im Zugversuch; unten KP mit und ohne Risse in den Querlagen

In verschiedenen Versuchen hat sich der Ausfall der Querlagen durch zahlreiche Mikrorisse innerhalb der Querfurniere gezeigt. Das Versagen der Querlagen zeichnete sich im Spannungs – Weg – Diagramm (s. Abbildung 50) durch eine Krümmung (Abschnitt 2) der zunächst linear verlaufenden Kurven (Abschnitt 1) ab. Die volle Materialfestigkeit wird bei Ausfall der Querlagen ausschließlich durch die parallel der Krafrichtung orientierten Furnierlagen erreicht (Abschnitt 3).

3.6.3 Schichtfehler

Der Einfluss von Schichtfehlern auf die Zugfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurde anhand von Zugversuchen ermittelt. Die Untersuchung konzentrierte sich dabei auf Schichtfehler in den Querlagen, da diese aufgrund der Furnierabmessungen deutlich häufiger auftreten als Schichtfehler in den Längslagen. Es wurden dafür gezielt Prüfkörper mit Fehlstellen der jeweiligen Typen erzeugt, an denen

der Zugfestigkeitsabfall in Abhängigkeit der Art und des Umfangs der Fehlstellen (vgl. Abbildung 35, S. 40) dokumentiert wurde.

Es zeigte sich ein klarer Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit, der Art sowie dem Umfang von Schichtfehlern. Während sich mit fehlerfreien Querschnitten die höchsten Festigkeiten erzielen ließen, zeigte sich an fehlerbehafteten Prüfkörpern eine geringere Festigkeit. Traten zwei Überlappungen im gleichen Prüfkörperabschnitt auf, so fiel die mittlere gemessene Festigkeit als auch die charakteristische Festigkeit im Vergleich zur Prüfreihe ohne Schichtfehler auf ca. 30 %. Die Prüfkörper, die einen stumpfen Furnierstoß in einer einzigen Querlage aufwiesen, zeigten nahezu die gleichen Festigkeiten wie die fehlerfreien Prüfkörper (vgl. Abbildung 51). Zudem können Schichtfehler im Bereich der Keilzinkenverbindung die Keilzinkenfestigkeit massiv herabsetzen, vgl. Abbildung 94, S. 94.

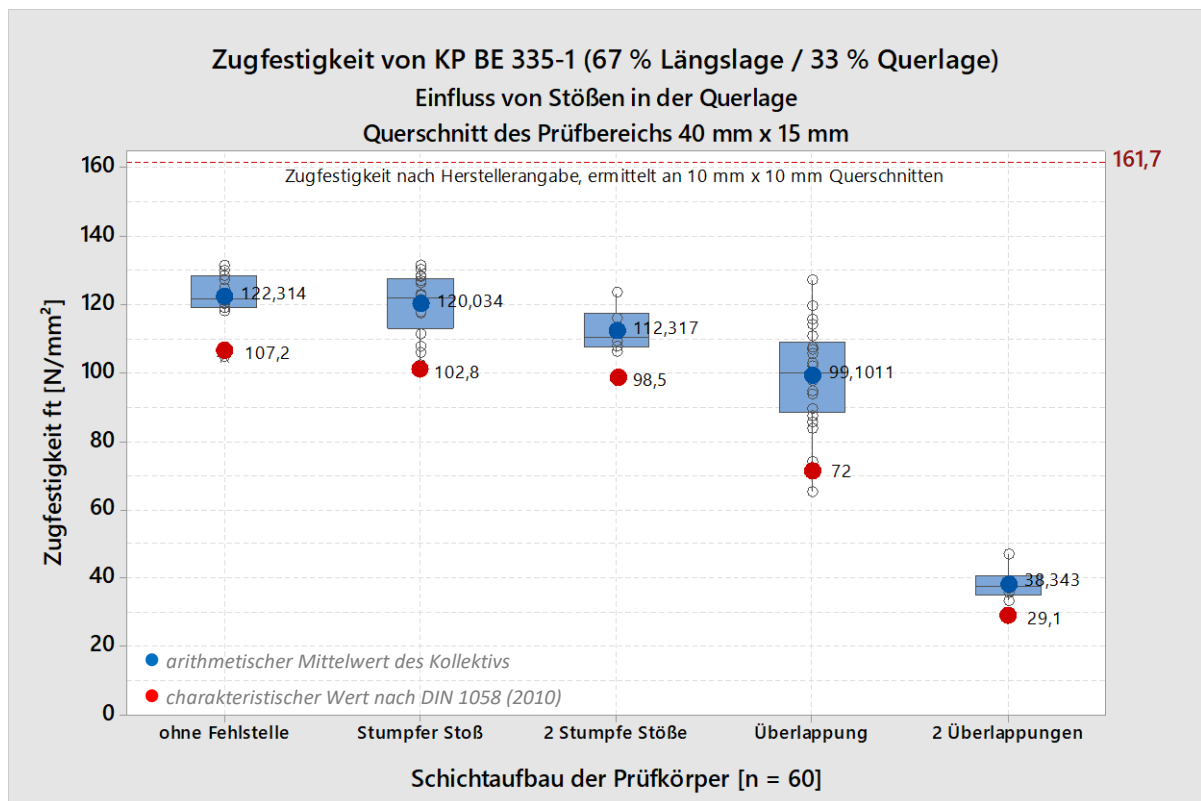


Abbildung 51: Darstellung der Festigkeitskennwerte von Prüfkörpern ohne Schichtfehler und Prüfkörper mit unterschiedlichen Arten und unterschiedlicher Anzahl von Schichtfehlern

3.6.3.1 Erklärungsansatz für den negativen Einfluss von Furnierüberlappungen auf die Zugfestigkeit

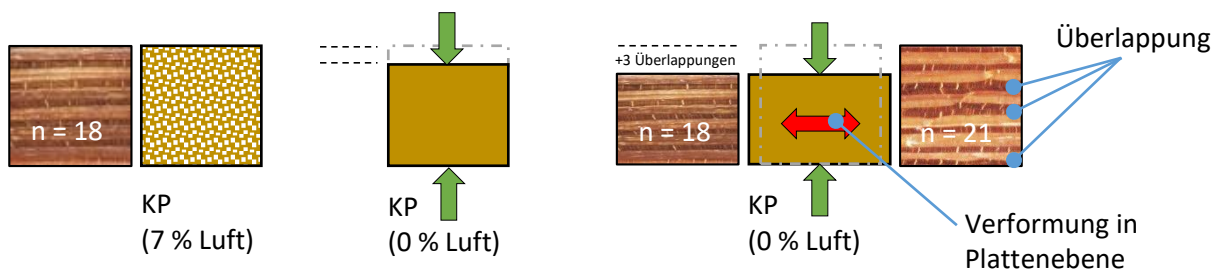


Abbildung 52: Modell zur Beschreibung lokaler Dichtespitzen bei Furnierüberlappungen

Bei einem spezifischen Gewicht von $1,4 \text{ g/cm}^3$ beträgt der Luftanteil in KP noch etwa 7 % (vgl. Abbildung 52, links, S. 56). Befinden sich bei einer definierten Querschnittsstärke durch die Furnierstoßüberlagerung lokal eine höhere Anzahl an Furnierschichten als im übrigen Plattenquerschnitt, so muss der Querschnitt im Bereich der Furnierüberlappung stärker verdichtet werden (vgl. Abbildung 52, Mitte). Sind die Zellwände vollständig aneinander gefaltet, steht für eine weitere Verdichtung kein mit Luft gefüllter Hohlraum mehr zur Verfügung. Es kommt zu einer lokalen Deformation der Furniere in die Plattenebene (vgl. Abbildung 52, rechts). Diese Deformation in die Plattenebene führt zur lokalen Vorspannung der für die Zugfestigkeit notwendigen Längsfurniere und damit zu einer Reduktion der Tragfähigkeit des Plattenwerkstoffes.

Um hohe Zugfestigkeiten zu garantieren sollte KP mit möglichst wenigen Schichtfehlern hergestellt werden. Stöße sollten nur als stumpfe Stöße und nicht als Furnierüberlappungen ausgebildet werden.

3.6.4 Kennwerte der Zugfestigkeit und der Zugsteifigkeit, ermittelt nach (DIN EN 1058, 2010) ¹²

Für die Ermittlung der charakteristischen Zugfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurden die Festigkeitsdaten aus den Versuchsreihen G, H und J zugrunde gelegt [$n = 27$]. Es gehen nur Kennwerte mit ein, die an fehlerfreien Querschnitten ohne Furnierstöße (Reihe H) und an Querschnitten mit einem stumpfen Furnierstoß (Reihe G und Reihe J) ermittelt wurden.

$$f_{t,k} = 105,55 \text{ N/mm}^2$$

Für die Ermittlung des charakteristischen Zug-Elastizitätsmodul von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurden die Steifigkeitsdaten aus der Versuchsreihe G zugrunde gelegt [$n = 11$].

$$E_{t,\text{mean}} = 17.275 \text{ N/mm}^2$$

3.6.5 Zusammenfassung

Die Referenzprüfungen zur Bestimmung der Druckfestigkeit und der Zugfestigkeit zeigten jeweils geringere Festigkeiten als die im Vorfeld (vgl. Tabelle 5) ermittelten. Die Druckfestigkeit an KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q (in Plattenebene) fiel 6 %, die Zugfestigkeit sogar 24 % geringer aus. Hierbei gilt es zu beachten, dass bei einem unmittelbaren Festigkeitsvergleich Größeneffekte zu berücksichtigen sind. Auch die Tatsache, dass bei geringen Plattenstärken der Anteil an hochverdichteten Randfurnieren größer ausfällt als es bei größeren Plattenstärken der Fall ist, ist zu berücksichtigen. Zudem ist unklar, wie groß die Streuung der Festigkeitseigenschaften von KP unterschiedlicher Produktionschargen ausfällt.

¹² vgl. Anhang, Kap. A- 3.2.1, S. A-17

Ergebnisse aus den Zugversuchen mit KP BE335-1:

- „Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm von KP zeigt einen ausgeprägten spröden Charakter. Der Bruch tritt ohne nennenswerte plastische Deformation, splittrig und ohne Vorankündigung ein [. .].
- Die Längszugfestigkeit von KP BE 335-1 hängt vom Anteil der Längslagen ab. Je größer der Anteil von Längslagen [sic!] desto größer die Längszugfestigkeit [sic!] und desto kleiner die Querszugfestigkeit [. .].
- Die Längszugfestigkeit des KPs wird maßgeblich durch Schichtfehler beeinflusst. Ab einer gewissen Bauteilabmessung müssen Furniere innerhalb eines KP-Elementes gestoßen werden. In erster Linie treten diese Stöße dabei in den Querlagen auf. Das hängt damit zusammen, dass die einzelnen Furniere mehrere Meter lang, aber nur wenige Dezimeter breit sind. Der Furnierstoß kann auf zwei verschiedene Arten ausgebildet werden [. .]. Zum einen können sich Furniere überlagern (Schichtfehler Typ 1), zum anderen können Furniere aber auch mit Abstand zu einander gestoßen werden (Schichtfehler Typ 2). In den Versuchsreihen wurden ausschließlich Schichtfehler in den Querlagen untersucht.
- Während ein Schichtfehler als zwei auf Abstand gestoßene Querlagen zu keinem signifikanten Abfall in der Längszugfestigkeit des KPs führte, so zeigten [sic!] sich bei zwei übereinander angeordneten Fehlstellen dieser Art ein Festigkeitsabfall von ca. 8% gegenüber schichtfehlerfreiem KP.
- Einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Längszugfestigkeit hatten Schichtfehler als überlagerte Querlagen. Eine einzige Überlagerung führte bereits zu einem Festigkeitsabfall von 20%; übereinander angeordnete Überlagerungen führten zu einem Festigkeitsabfall von 70% gegenüber schichtfehlerfreiem KP.
- Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden [sic!] für eine Verwendung als Verstärkung am Stabende der Schichtaufbau des KPs speziell definiert. Es dürfen keine Schichtfehler des Typs 1 vorhanden sein. Weiterhin darf auf eine KP-Stärke von 1,5 cm nur ein Schichtfehler des Typs 2 vorhanden sein.
- Des Weiteren wurde seitens der TU Kaiserslautern für die Produktion von KP eine Empfehlung zur allgemeine Vermeidung der Überlappung von Querlagen ausgesprochen.
- Inwieweit längsgestoßene Furniere die Längszugfestigkeit des KPs beeinflussen wurde nicht untersucht, da die für die Verstärkung der Stabenden verwendeten Furniere im Gegensatz zu den Querstößen problemlos ohne Furnierlängsstoß produziert werden können.“ (Graf, Röver & Schmeing, 2018, S. 8f.)

4 Klebverbindungen in Faserlängsrichtung

Nachfolgend werden die beiden wesentlichen Arten der Klebverbindung vorgestellt:

4.1 Schäftung



Abbildung 53: Schäftungsverbindung zwischen nativer Fichte und KP

Die Schäftung stellt eine stoffschlüssige Klebverbindung im Holzbau dar. Sie bietet die Möglichkeit tragende Holzbauteile praktisch unbegrenzt zu verlängern. Dabei werden Holzelemente (z. B. Bretter oder Balken) in Faserlängsrichtung dauerhaft miteinander verbunden. Bei einer Schäftung werden die Stirnholenden zweier Elemente unter einem flachen Winkel α angeschnitten und dann über die Schnittfläche – wie in Abbildung 53 dargestellt – miteinander verklebt. Durch die keilförmig angeschnittenen Flanken wird die Klebfläche stark vergrößert, sodass der Bereich, in dem der Klebstoff mit der Holzoberfläche interagieren kann, auf ein Vielfaches des eigentlichen Bauteilquerschnittes vergrößert wird. Abbildung 54 zeigt anhand eines geschäfteten Querschnitts und eines stumpf gestoßenen Querschnittes, dass unter der Annahme einer kontinuierlichen Ausbildung einer molekularen Verbindung pro Längeneinheit L (Adhäsionskräfte), sich deutlich mehr molekulare Verbindungen im geschäfteten Stoß als im stumpfen Stoß ausbilden können (Adhäsionsbrücken).

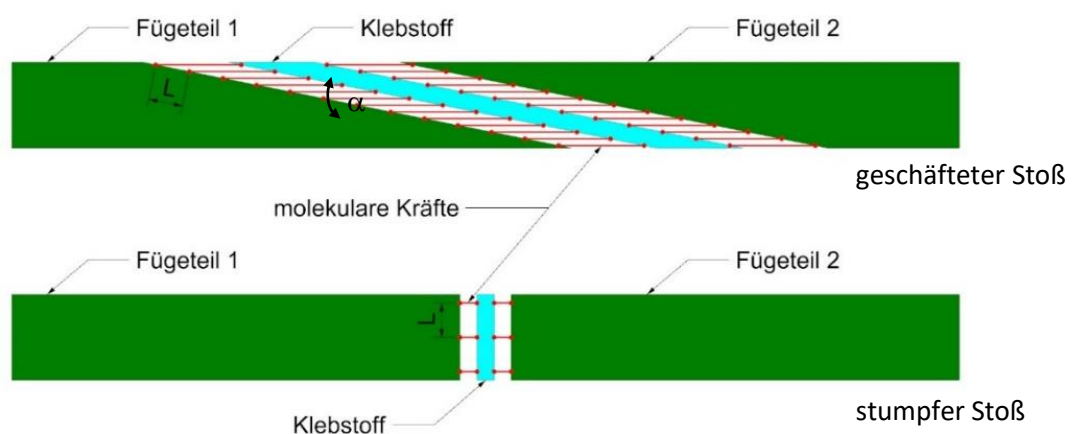


Abbildung 54: Schema zur Ausbildung von „Adhäsionsbrücken“

Mit der geometrischen Beziehung: $L_{\text{geschäftet}} = \frac{L_{\text{stumpf}}}{\sin \alpha}$ wird klar, dass die Anzahl molekularer Verbindungen mit abnehmendem Winkel α steigt.

Nach DIN EN 1995-1-1 NA (2013, S. 98) darf die Klebeflächenneigung höchstens 1/10 betragen, damit verhältnismäßig kleine Spannungen in der Klebefläche auftreten.

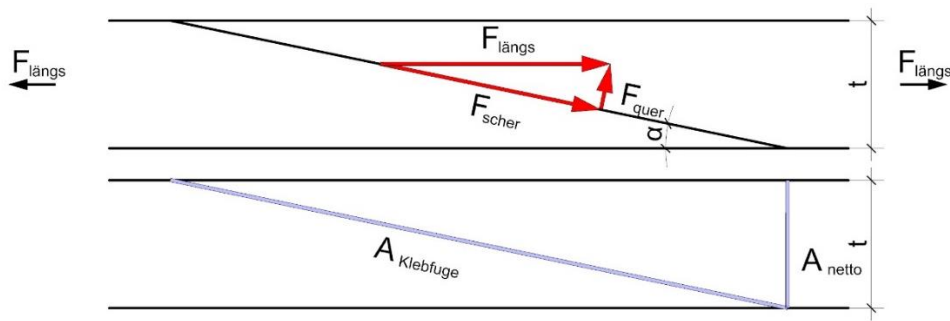


Abbildung 55: Darstellung von Kräften in der Klebfuge einer Schäftung

$$F_{quer} = F_{längs} \times \sin \alpha \qquad F_{scher} = F_{längs} \times \cos \alpha$$

$$A_{netto} = t \times s \qquad A_{Klebfuge} = \frac{t \times s}{\sin \alpha}$$

s = Querschnittsabmessung in die Blattebene

Die Spannungen berechnen sich wie folgt:

Normalspannung:
$$\sigma_{t,0} = \frac{F_{längs}}{t \times s}$$

(im ungeschwächten Querschnitt)

Querspannung:
$$\sigma_{t,\alpha} = \frac{F_{quer}}{A_{Klebfuge}} = \frac{F_{längs} \times \sin \alpha}{\frac{t \times s}{\sin \alpha}} = \frac{F_{längs}}{t \times s} \times (\sin \alpha)^2$$

$$= \sigma_{t,0} \times \sin^2 \alpha$$

Scherspannung:
$$\tau_{\alpha} = \frac{F_{scher}}{A_{Klebfuge}} = \frac{F_{längs} \times \cos \alpha}{t \times s / \sin \alpha} = \frac{F_{längs}}{t \times s} \times \sin \alpha \times \cos \alpha$$

$$= \sigma_{t,0} \times \sin \alpha \times \cos \alpha$$

Für den Winkel $\alpha = 5,7^\circ$ ergibt sich eine Querspannung von $\sigma_{t,\alpha} \sim 0,01 \sigma_{t,0}$ und eine Scherspannung von $\tau_{\alpha} \sim 0,1 \sigma_{t,0}$.

Aus den geometrischen Abhängigkeiten lassen sich für die unterschiedlichen Holzarten optimale Schäftungswinkel bestimmen. Diese können Tabelle 6 entnommen werden. Die Winkel sind dabei so gewählt, dass unter einer Belastungssituation bei steigender Belastung die Quer- und Scherfestigkeit gleichzeitig erreicht wird.

Tabelle 6: Optimale Schäftungswinkel zur Verklebung unterschiedlicher Holzarten. Festigkeiten nach DIN 68364 (2003)

	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
$f_{t,mean}$ [N/mm ²]	95	100	135	110
$f_{v,mean}$ [N/mm ²]	10	10	10	11,5
$f_{t,mean} / f_{v,mean}$	0,105	0,100	0,070	0,105
Winkel [°]	6,1	5,8	4,0	6,1

Geschäftete Bauteile dürfen laut DIN EN 1995-1-1/NA (2013, S. 98) nur in der Nutzungsklasse 1 und 2 Verwendung finden. Für Winkel $\alpha < 5,7^\circ$ - das entspricht einer Klebeflächenneigung von unter 1/10 - darf bei der Bemessung die volle Tragfähigkeit des ungeschwächten Querschnitts angesetzt werden (DIN EN 1995-1-1/NA, 2013, S. 98). Als Klebstoffe sind die in DIN EN 301 (2018) aufgeführten Klebstoffe zu verwenden.

4.1.1 Festigkeit von Schäftungsverbindungen zwischen nativer Fichte und KP ¹³

Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Schäftungsverbindungen mit einem Schäftungswinkel von $5,7^\circ$ zwischen nativer Fichte und KP wurden Zugprüfungen an geschäfteten Querschnitten durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mit Ergebnissen von Zugversuchen an keilgezinkten Querschnitten verglichen.

Mit der Schäftungsverbindung können vergleichsweise hohe Klebfestigkeiten erzielt werden. Im Vergleich zu keilgezinkten Querschnitten sind die Festigkeitskennwerte von Schäftungsverbindungen jedoch mit relativ hohen Streuungen behaftet (vgl. Abbildung 56, in orange dargestellt). Somit fallen die berechneten charakteristischen Festigkeiten äußerst gering aus.

Gegenüber Keilzinkenverbindungen des Typs I-20 zwischen Fichte und KP fällt die charakteristische Zugfestigkeit der Schäftungsverbindung unter $5,7^\circ$ um 52 % schlechter und gegenüber Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 sogar um 65 % schlechter aus.

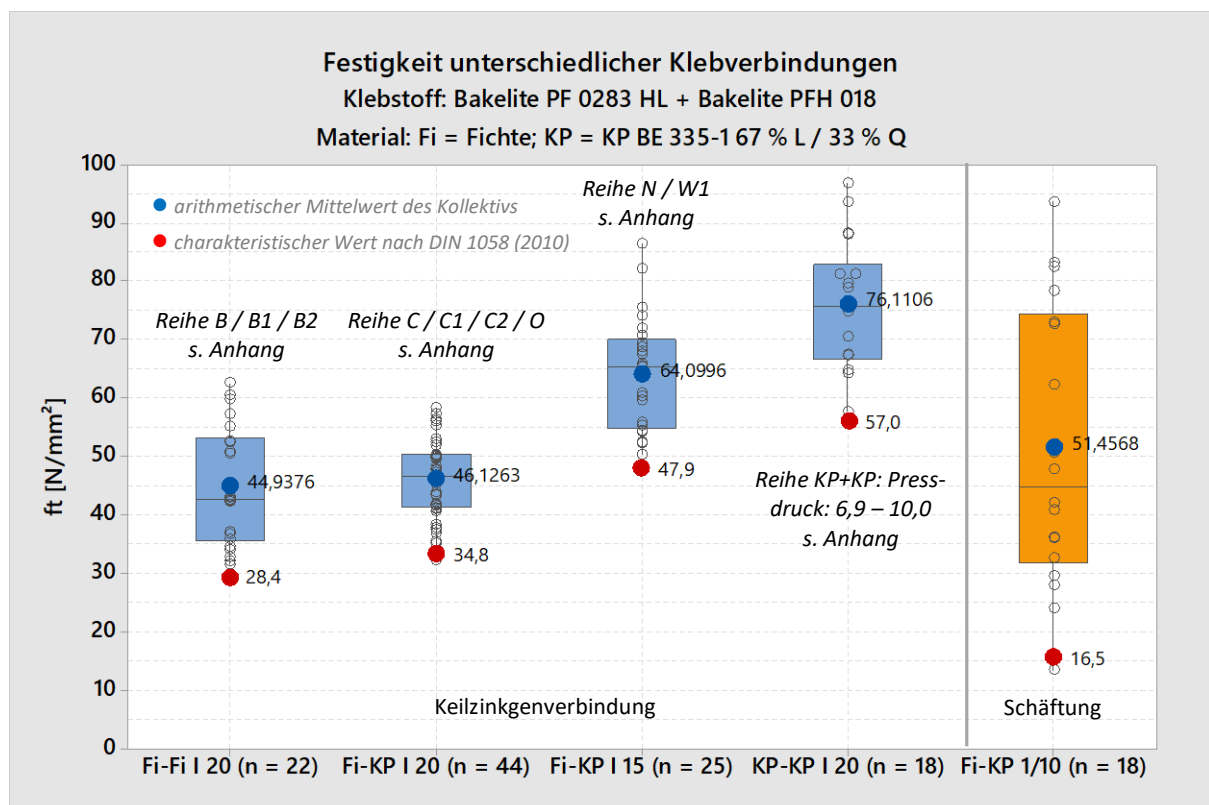


Abbildung 56: Festigkeit unterschiedlicher Klebverbindungen; blau: Keilzinkenverbindung, orange: Schäftung

¹³ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.2, S. A-18

Aufgrund des flachen Neigungswinkels macht eine Schäftung nur bei schlanken Bauteilen Sinn, da mit Zunahme der Bauteilhöhe auch die Schnittkante wächst und damit auch der Materialverlust. Ein weiterer Nachteil der Schäftung gegenüber einer Keilzinkung (vgl. Kap. 4.2) stellt die fehlende Anfangsfestigkeit der Verbindung dar. Somit ist die Weiterverarbeitung geschäfteter Bauteile erst nach Abbinden des Klebstoffs möglich. Dies hat zur Folge, dass die Presswerkzeuge über die Dauer des Aushärtevorganges blockiert sind. Zudem kann bei höheren Bauteilen und damit längerer Schnittkante die Genauigkeit des Schnittes nicht mehr garantiert werden.

Ein großer Vorteil von Schäftungsverbindungen gegenüber Keilzinkenverbindungen liegt in der Spannungsverteilung innerhalb der Klebfuge. Während die Klebfuge von Keilzinkenverbindungen ungleichmäßig beansprucht wird und sich Spannungsspitzen am Anfang und am Ende der Keilzinkenverbindung ausbilden (vgl. Kap. 4.2.3), ist die Spannungsverteilung innerhalb der Klebfuge von Schäftungen gleichmäßig; es bilden sich keine Spannungsspitzen am Anfang und am Ende der Klebfuge aus (vgl. Kap. 4.2.3, S. 70).

Aufgrund der hohen Streubreite der Festigkeit sind Schäftungsverbindungen zwischen KP und Fichte ungeeignet. Die Ursache der großen Streuung ist nicht auf die Schäftung selbst, sondern auf das Schäftungsverfahren und hierbei insbesondere auf die Aufrechterhaltung des Pressdrucks während der Aushärtung der Klebfuge zurückzuführen.

Aus diesem Grund wird von einer Schäftungsklebung nach Abbildung 21 (2), S. 25 Abstand genommen.

4.2 Keilzinkenverbindung



Abbildung 57: Keilzinkenverbindung des Typs I-15 zwischen Fichte und KP

Als wichtiges konstruktives Element des Holzbaus kann die Keilzinkenverbindung verstanden werden. Sie stellt neben der Schäftung eine weitere Möglichkeit dar, Holz oder Holzwerkstoffe mit Hilfe geeigneter Klebstoffe über eine Vielzahl kleiner Zähne, den sogenannten Keilzinken, dauerhaft mit einander zu verbinden. Als „Selbstzentrierende Endverbindung, die gebildet wird, indem eine Reihe von gleichartigen, symmetrischen, spitz zulaufenden Keilzinken in den Endstücken der Holzbauteile maschinell eingefräst und dann verklebt werden, ...“ (EN 385, 2007, S. 4) ist sie definiert. Mit dieser Art der Verbindung ist es möglich, Schadstellen aus Brettern, Bohlen oder Balken auszukappen und die zurückbleibenden - weitgehend fehlerfreien - Holzquerschnitte wieder zusammenzufügen.

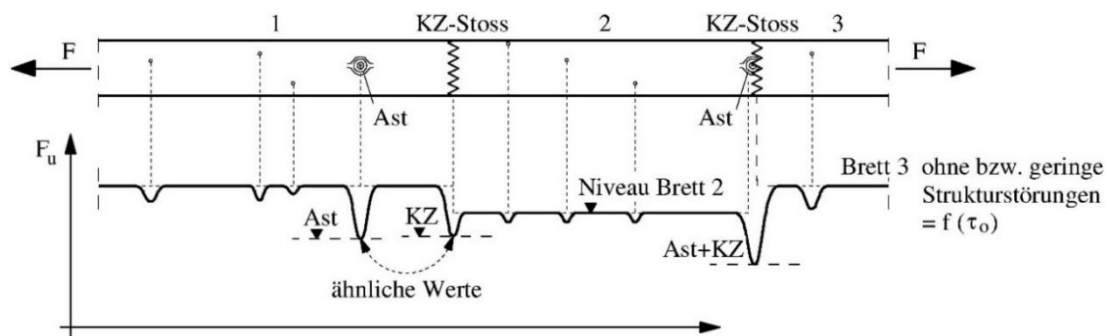


Abbildung 58: Verlauf der Zugfestigkeit über die Stablänge einer keilgezinkten Brettlamelle

Dadurch entstehen wirtschaftliche und technisch hochwertige Tragelemente, deren Länge weitgehend unabhängig von der natürlich begrenzten Baumstammlänge ist. Es gilt zu beachten, dass die Reduktion von Holzfehlern durch das Auskappen nur so lange Sinn macht, bis die Grundfestigkeit des Materials mit zulässigem Fehlerkriterium die Keilzinkenfestigkeit nicht überschreitet. Für absolut fehlerfreies Holz stellt die Keilzinkenverbindung immer die Schwachstelle dar. Der höchstmögliche nominelle Wirkungsgrad¹⁴, der mit einem normierten Profil erreicht werden kann, liegt bei 92 % für das Profil I-7,5 nach (DIN 68140, 1971, S. 1). Der effektive mechanische Wirkungsgrad¹⁵ dieses Profils liegt bei 84 % (vgl. Tabelle 9, S. 81).

Da die Verbindung durch Reibung der Flankenoberflächen bereits ein Haftvermögen aufweist, muss sie bei kleinen Lasten nicht zwangsläufig verleimt werden. Für tragende Zwecke müssen Keilzinkenverbindungen jedoch mit geeignetem Klebstoff nach (EN 301, 2018) verklebt werden. Beim Verkleben der Fügepartner trägt das Haftvermögen durch Oberflächenreibung dazu bei, die Presszeit gegenüber einer Schäftungsverbindung erheblich zu verkürzen. Die Presszeit industriell gefertigter Keilzinkenstöße liegt nach DIN EN 15497 (2014, S. 43) für Querschnitte mit einer Stärke von < 45 mm bei einer Sekunde und für größere Querschnittsstärken bei zwei Sekunden.

¹⁴ Der nominelle Wirkungsgrad berücksichtigt geometrische Querschnittsschwächungen durch die Keilzinken.

¹⁵ Der effektive Wirkungsgrad berücksichtigt mechanische Schwächungen infolge einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung.

Normgerechte Ausführungen von Keilzinkenverbindungen sind nur unter Hölzern der gleichen Holzart - unabhängig ob Nadelholz oder Laubholz - zulässig. Dabei ist zu beachten, dass als Bauholz nach DIN 1052 (2008, S. 233) nur die nachfolgend genannten Holzarten zugelassen sind:

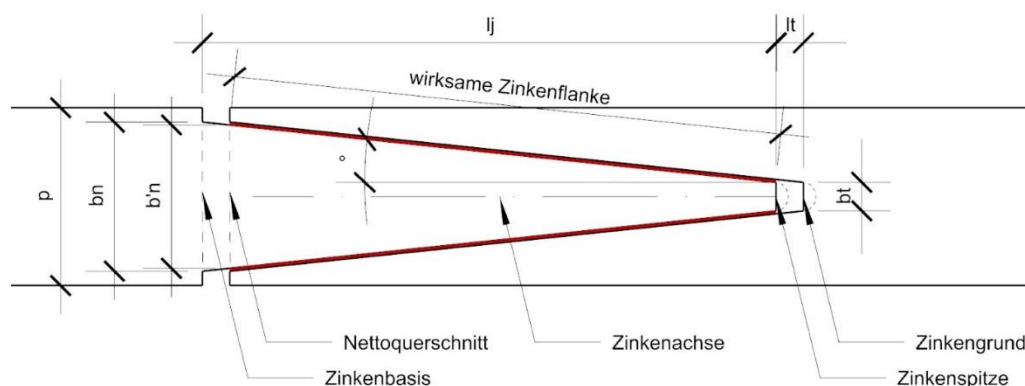
Nadelhölzer: Fichte* (bis C16), Tanne* (bis C16), Kiefer* (bis C24), Lärche* (bis C24), Douglasie* (bis C30), Southern Pine (bis C30), Western Hemlock (bis C35) und Yellow Cedar (bis C40). (* Zugelassen für Konstruktionsvollholz (KVH))

Laubhölzer: Eiche (bis D30), Teak (bis D30), Keruing (bis D30), Buche (bis D35), Afzelia (bis D40), Merbau (bis D40), Angélique (Basralocus) (bis D40), Azobé (Bongossi) (bis D60) und Ipé (Greenheart) (bis D60).

Die Zinkengeometrie der Keilzinkung ist durch 4 Parameter definiert.

- die Zinkenlänge l (bzw. l_j)
- die Zinkenteilung p
- die Breite des Zinkengrundes (der Zinkenspitze) b_t
- das Zinkenspiel l_t .

Des Weiteren werden bei der Beschreibung von Keilzinkenverbindungen die Begriffe „wirksame Zinkenflanke“, „Nettozinkenbreite“, „wirksame Nettozinkenbreite“ verwendet (vgl. Abbildung 59).



l = Zinkenlänge
 p = Zinkenteilung

l_t = Zinkenspiel
 b_n = Nettozinkenbreite

b_t = Zinkenspitzenbreite
 b'_n = wirksame Nettozinkenbreite

Abbildung 59: Keilzinkung – Begriffe

4.2.1 Verwendung und Herstellung

Keilzinken werden in verschiedenen Bereichen des Holzbaus eingesetzt. Bei Konstruktionsvollholz werden die Holzenden über ihre gesamte Länge miteinander verzinkt. Bei Duo- oder Triobalken werden - wie auch bei Brettschichtholz - die einzelnen Teillamellen gezinkt hergestellt und flächig mit einander verklebt. Dabei wird darauf geachtet, dass die Verzinkung der Teillamellen nicht an jeweils der gleichen Stelle des Trägers auftritt, um die Verschwächungen der Einzellamellen nicht an ein und demselben Ort zu konzentrieren. Werden hingegen zwei Brettschichtholzenden über eine einzige Keilzinkung miteinander verklebt - der sogenannten Universalkeilzinkenverbindung - kommt es durchgängig zur lokalen Schwächung des Querschnitts, die bei einer statischen Bemessung berücksichtigt werden muss.

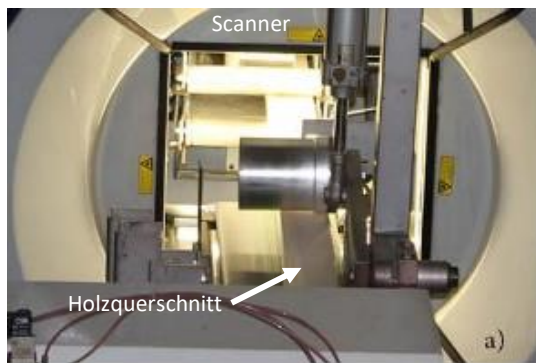


Abbildung 60: Stationen der Herstellung von Keilzinkenverbindungen. Hier Scannen der Oberflächen

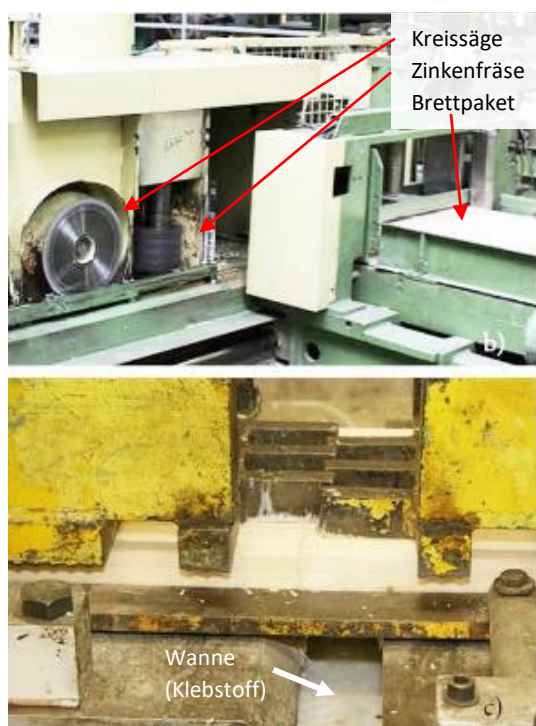


Abbildung 61: Stationen der Herstellung von Keilzinkenverbindungen. Hier Sägen, Fräsen und Kleben



Abbildung 62: Keilzinkenfräse am T-Lab der TU Kaiserslautern

Keilzinkenverbindungen werden im Dauerbetrieb und vollautomatisiert auf industriellen Großanlagen, in erster Linie in Brettschichtholzwerken, hergestellt. Nachdem Schadstellen in der Brettlamelle - z. B. Äste - visuell oder maschinell (vgl. Abbildung 60) lokalisiert worden sind, werden diese mit einer Kappsäge ausgeschnitten. Dadurch entstehen unterschiedlich lange Brettstücke. Anschließend werden die Brettstücke in der Keilzinkenfräse bearbeitet. Die Bearbeitung der Brettlamellen erfolgt dabei blockweise, in Paketen von mehreren Brettern, die durch eine Pressvorrichtung fixiert sind.

Zunächst wird das Stirnholz des Brettpakets mittels Kreissäge plan geschnitten. Unmittelbar danach werden die Keilzinken in das Stirnholz gefräst (vgl. Abbildung 61, b).

Der Klebstoffauftrag und das anschließende Zusammenpressen der Querschnitte erfolgt ebenfalls vollautomatisiert (Abbildung 61, c). Das Ergebnis ist eine Endloslamelle, die je nach gewünschter Lamellenlänge gekappt wird.

Veränderliche Parameter sind die Vorschubgeschwindigkeit, der Profiltyp, der Pressdruck, die Umdrehungszahl der Frässpindel und die Leimauftragsmenge.

In Handwerksbetrieben erfolgt die Herstellung von Keilzinken teildautomatisiert. Die Maschine wird durch den Maschinisten beschickt und der Fräsvorgang wird anschließend manuell ausgelöst. Die Bearbeitung der Werkstücke erfolgt dabei einseitig. Der Klebstoff wird in einem separaten Arbeitsschritt, meistens händisch, auf die Querschnitte aufgetragen. Das Pressen der Querschnitte erfolgt in einem dritten Arbeitsschritt.

Kleinanlagen für Handwerksbetriebe sind nicht für die Herstellung tragender Querschnitte zugelassen. Ihr Einsatzgebiet liegt beispielsweise in Tischlereien, oder im Fensterbau. Die Kappsäge und das Fräs-
werkzeug sind stationär, das zu bearbeitende Werkstück wird am Bearbeitungswerkzeug vorbeige-
führt. Der Maschinentyp eignet sich in erster Linie für die Bearbeitung kurzer Werkstücke.

Veränderliche Parameter sind die Vorschubgeschwindigkeit und der Profiltyp.

Die Herstellung der Prototypen für die Versuchsreihen innerhalb dieser Arbeit erfolgte in erster Linie auf der Kleinanlage am T-Lab der TU Kaiserslautern.

4.2.2 Wirkungsweise

Die Wirksamkeit geklebter Keilzinkenverbindungen beruht auf der Vergrößerung der in Faserlängsrich-
tung zur Verfügung stehenden Klebefläche. Die Flanken der Keilzinken sind mit einem Winkel von etwa
7,5 ° geneigt. Damit fällt die Neigung etwas größer aus als bei einer Schäftung, bei der in der Regel ein
Neigungsverhältnis von 1/10 ~ 5,7 ° nicht überschritten werden darf. Durch das geringe Neigungsver-
hältnis fällt die Größe der Scher- als auch der Querspannungen in der Fuge der Keilzinkenverbindung,
im Vergleich zum Anteil der übertragbaren Längsspannung, sehr gering aus.

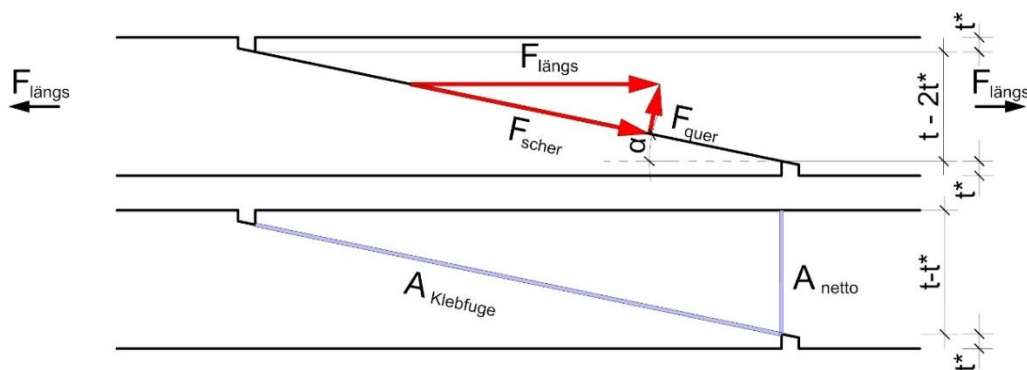


Abbildung 63: Darstellung von Kräften in der Klebfuge einer Keilzinkenverbindung

$$F_{quer} = F_{längs} \times \sin \alpha \quad F_{scher} = F_{längs} \times \cos \alpha$$

$$A_{nett} = (t - t^*) \times s \quad A_{Klebfuge} = \frac{(t - 2t^*) \times s}{\sin \alpha}$$

s = Querschnittsabmessung in die Blattebene

Die Spannungen berechnen sich wie folgt:

Normalspannung: $\sigma_{t,0} = \frac{F_{längs}}{t \times s}$
(im ungeschwächten Querschnitt)

netto Normalspannung: $\sigma_{t,n} = \frac{F_{längs}}{(t - t^*) \times s}$

$$\sigma_{t,n} > \sigma_{t,0}$$

$$\sigma_{t,n} \times x = \sigma_{t,0} \quad (x = \text{Faktor für Spannungsanstieg im Nettoquerschnitt})$$

$$x \times \frac{F_{\text{längs}}}{(t-t^*) \times s} = \frac{F_{\text{längs}}}{t \times s}$$

$$x \times \frac{1}{(t-t^*)} = \frac{1}{t}$$

$$x = \frac{1}{t} \times \frac{t-t^*}{t}$$

$$x = 1 - \frac{t^*}{t}$$

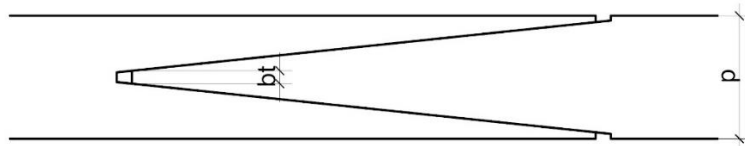


Abbildung 64: Keilzinkenverbindung: Zinkenspitze b_t und Zinkenteilung p

Für Keilzinkenverbindungen ist: $t^* = \frac{1}{2} \times b_t$ und $t = \frac{1}{2} \times p$ bzw. $\frac{b_t}{p} = v$.

$$x = 1 - \frac{b_t}{p}$$

$$x = 1 - v$$

netto Normalspannung: $\sigma_{t,n} = \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-v}$ (v = Reduktionsfaktor)

Querspannung: $\sigma_{t,\alpha} = \frac{F_{\text{quer}}}{A_{\text{Klebfuge}}} = \frac{F_{\text{längs}} \times \sin \alpha}{\frac{(t-2t^*) \times s}{\sin \alpha}} = \frac{F_{\text{längs}}}{(t-2t^*) \times s} \times (\sin \alpha)^2$

$$\sigma_{t,\alpha} = \sigma_{t,0} \times y$$

$$\frac{F_{\text{längs}}}{(t-2t^*) \times s} \times (\sin \alpha)^2 = \frac{F_{\text{längs}}}{t \times s} \times y$$

$$\frac{1}{(t-2t^*)} \times (\sin \alpha)^2 = \frac{1}{t} \times y$$

$$\frac{1}{y} = \frac{1}{t} \times (t - 2t^*) \times \frac{1}{(\sin \alpha)^2}$$

$$\frac{1}{y} = 1 - \frac{2t^*}{t} \times \frac{1}{(\sin \alpha)^2}$$

$$y = \frac{1}{1-2v} \times (\sin \alpha)^2$$

$$\sigma_{t,\alpha} = \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-2v} \times (\sin \alpha)^2$$

Scherspannung: $\tau_{\alpha} = \frac{F_{\text{scher}}}{A_{\text{Klebfuge}}} = \frac{F_{\text{längs}} \times \cos \alpha}{\frac{(t-2t^*) \times s}{\sin \alpha}} = \frac{F_{\text{längs}}}{(t-2t^*) \times s} \times \sin \alpha \times \cos \alpha$

$$\tau_{\alpha} = \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-2v} \times \sin \alpha \times \cos \alpha$$

Unter der Annahme einer homogenen Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt wie auch entlang der Klebfuge kann für eine Schäftung mit einer Schäftungsneigung von $5,7^\circ$ die Quer- und Scherspannung vereinfacht wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sigma_{t,\alpha} \sim 0,01 \times \sigma_{t,0}$$

$$\tau_\alpha \sim 0,1 \times \sigma_{t,0}$$

Für eine Keilzinkenverbindung mit derselben Flankenneigung ($5,7^\circ$) lassen sich Normal-, Quer- und Scherspannung vereinfacht wie folgt ausdrücken:

$$\sigma_{t,n} \sim \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-\nu}$$

$$\sigma_{t,\alpha} \sim 0,01 \times \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-2\nu}$$

$$\tau_\alpha \sim 0,1 \times \sigma_{t,0} \times \frac{1}{1-2\nu}$$

Die für die Keilzinkenverbindung in Ansatz gebrachten geometrischen Überlegungen gehen von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung in der Klebfuge aus. Tatsächlich sind die Spannungen jedoch nicht konstant verteilt, sondern steigen an den Rändern der Klebfuge an.

4.2.3 Spannungsverteilung in der Klebstofffuge

4.2.3.1 Betrachtung einer einschnittig überlappten Klebung

Anmerkung: Für die nachfolgenden Betrachtungen seien Querschnittsabmessungen und Elastizitätsmoduln der beiden Fügeteilpartner jeweils gleich.

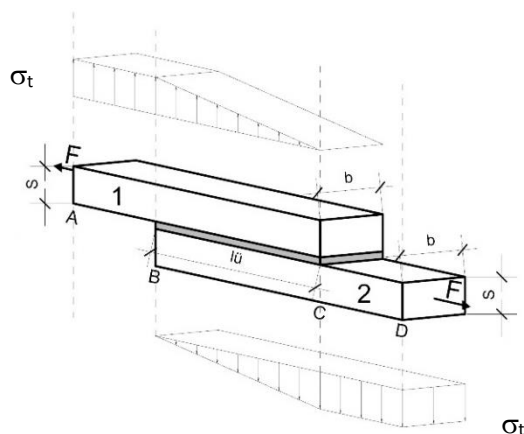


Abbildung 65: Darstellung einer einschnittig überlappten Klebung

In einer einschnittig überlappten Klebung (vgl. Abbildung 65) ist die Zugspannung in Element 1 im Intervall (A,B) zunächst konstant mit $\sigma_t = \frac{F}{b \times s_1}$. Im Intervall (B, C) nimmt sie linear bis auf den Wert 0 ab. Im gleichen Intervall steigt sie im Element 2 von 0 bis auf σ_t wieder an und bleibt im Intervall (C, D) konstant bei σ_t .

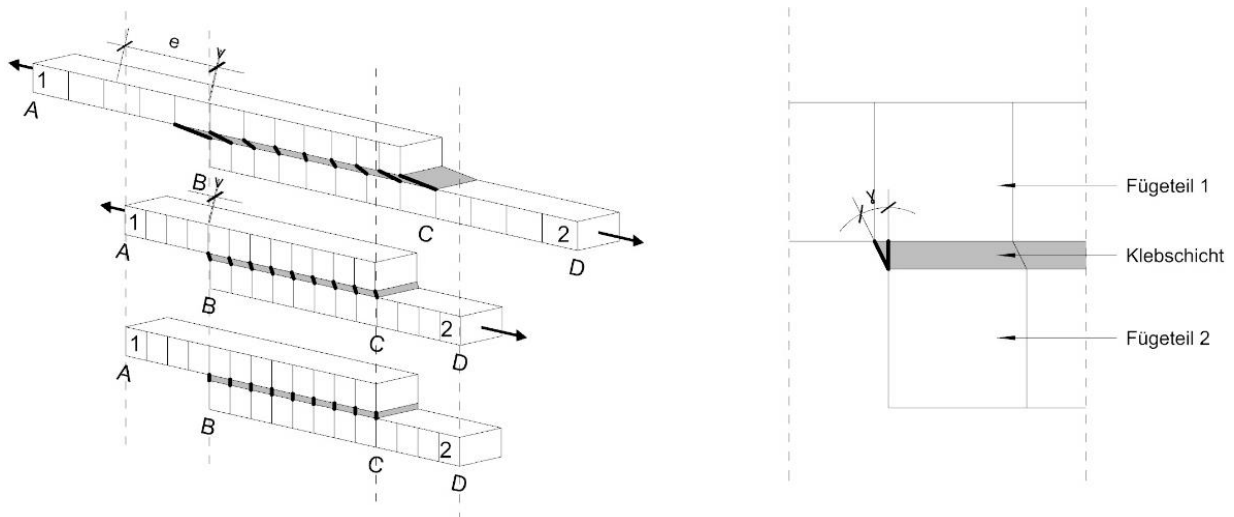


Abbildung 66: Verformungsverhalten einer Klebfuge in einer einschnittig überlappten Klebung (links: oben: elastische Dehnung der Querschnitte und der Klebfuge, Mitte: elastische Dehnung der Klebfuge, unten: Klebung ohne Belastung / rechts: Darstellung des Scherwinkels in der Klebfuge)

I: elastische Dehnung der Klebschicht, keine Dehnung in den Fügeparten:

Durch die Scherbeanspruchung der Kräfte F auf die Fuge kommt es zu einer elastischen Scherverformung der Klebfuge. Die Scherfuge verrautet (vgl. Abbildung 66, links, Mitte). In der Scherfuge wird eine konstante Scherspannung τ mit $\tau = \frac{F}{b \times l_{\text{ü}}}$ bzw. mit $\tau = G \times \tan \gamma$ hervorgerufen (vgl. Abbildung 66, rechts).

II: elastische Dehnung der Klebschicht und elastische Dehnung der Fügeparten:

Die Spannung σ_t verursacht eine Dehnung ε der beiden Fügeparten (vgl. Abbildung 66, links, oben). Die Dehnung ε ist mit $\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E}$ im Intervall (A,B) konstant und nimmt im Intervall (B,C) – da σ_t linear abnimmt – ebenfalls linear, bis auf 0 ab.

Anhand des über die Scherfuge verändernden Scherwinkels γ lässt sich über den Zusammenhang $\tau = G \times \tan \gamma$ ($G = \text{const.}$) herleiten, dass die Schubspannungsverteilung für den Fall - elastische Dehnung der Klebschicht und elastische Dehnung der Fügeparten - nicht konstant ist. Am Anfang und am Ende der Klebfuge, dort, wo die Scherwinkel am Größten sind, fallen die Schubspannungen ebenfalls am Größten aus (vgl. Abbildung 67, rechts).

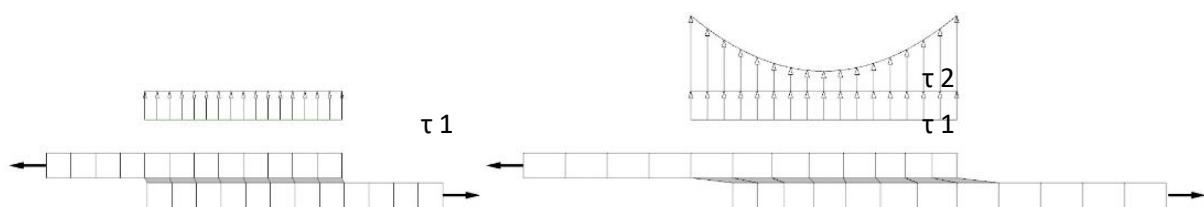


Abbildung 67: Schubspannungsverlauf in Klebfuge, links: Schubspannung durch Schubverformung der Klebschicht; rechts: Schubspannung durch Schubverformung der Klebschicht und durch Klebstoffverformung infolge Fügepartdehnung

Die Schubspannungsverteilung in der Klebschicht beinhaltet demzufolge einen Anteil aus konstantem Schubspannungsanteil τ_1 durch reine Verformung der Klebstoffuge und einen nichtkonstanten Spannungsanteil τ_2 durch Verformung der Klebschicht infolge der Fügepartdehnung (vgl. Abbildung 67).

4.2.3.2 Betrachtung einer Schäftungsklebung:

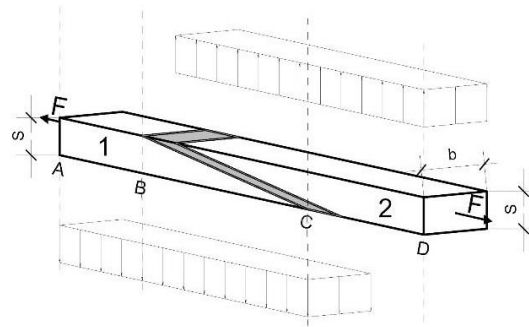


Abbildung 68: Darstellung einer Schäftungsverbindung

In einer Schäftungsverbindung (vgl. Abbildung 68) bleibt für Füge­teil 1 die Normalspannung im Inter­vall (A,B) konstant bei $\sigma_t = \frac{F}{b \times s_1}$. Auch im Intervall (B,C) bleibt die Spannung σ_t konstant, da die Ge­samst­eifigkeit über die Schäftungslänge konstant bleibt, im Gegensatz zur Überlappung, wo sie dop­pelt so hoch ist. Es reduziert sich lediglich die Querschnittsfläche der Schäftungsspitze und damit der übertragbare Kraftanteil. Für Füge­teil 2 bleiben die Spannungen im Intervall (B,C) und (C,D) konstant bei $\sigma_t = \frac{F}{b \times s_1}$.

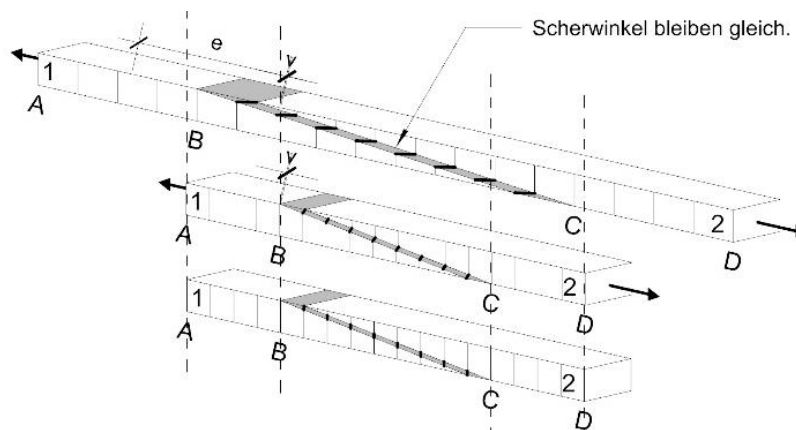


Abbildung 69: Verformungsverhalten der Klebfuge in einer Schäftungsverbindung (oben: elastische Dehnung der Querschnitte und der Klebfuge, Mitte: elastische Dehnung der Klebfuge, unten: Klebung ohne Belastung)

I: elastische Dehnung der Klebschicht, keine Dehnung in den Füge­teilen:

Durch die Scherbeanspruchung der Kräfte F auf die Fuge kommt es zu einer elastischen Scherverfor­mung der Klebfläche. Die Scherfuge verrautet (s. Abbildung 69, Mitte). In der Scherfuge wird eine konstante Scherspannung τ mit $\tau = G \times \tan \gamma$ hervorgerufen.

II: elastische Dehnung der Klebschicht und elastische Dehnung der Füge­teile:

Die Spannung σ_t verursacht eine Dehnung ε der beiden Füge­teile (vgl. Abbildung 69, oben). Die Dehnung ε ist mit $\varepsilon = \frac{\sigma_t}{E}$ in den Intervallen (A,B), (B,C) und (C,D) für beide Füge­teile konstant. Das bedeu­tet, dass auch die Dehnungen in jedem Punkt der Füge­teile einer Schäftungsverbindung gleich sind. Im Gegensatz zu einer einschnittig überlappten Klebung bleibt der Scherwinkel γ an jeder Stelle der Kleb­fuge gleich. Durch $\tau = G \times \tan \gamma$ ($G = \text{const.}$, $\tan \gamma = \text{const.}$) ist somit auch die Scherspannung an jeder Stelle der Klebfuge gleich groß. Es kommt zu keinem Spannungsanstieg am Anfang und am Ende der Klebfuge.

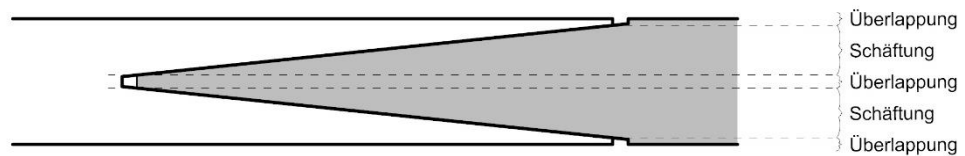


Abbildung 70: Keilzinkenverbindung. Modell: Aufteilung in Schäftungs- und Überlappungsbereiche

Eine Keilzinkenverbindung kann als Kombination aus Schäftungsanteilen und Überlappungsanteilen verstanden werden (vgl. Abbildung 70). Der Anteil der Überlappung bei einer Keilzinkenverbindung erklärt den Anstieg der Spannungen am Anfang und am Ende der Klebfuge (vgl. auch Abbildung 71).

4.2.3.3 Simulation der Spannungsverteilung in einer Keilzinkenverbindung

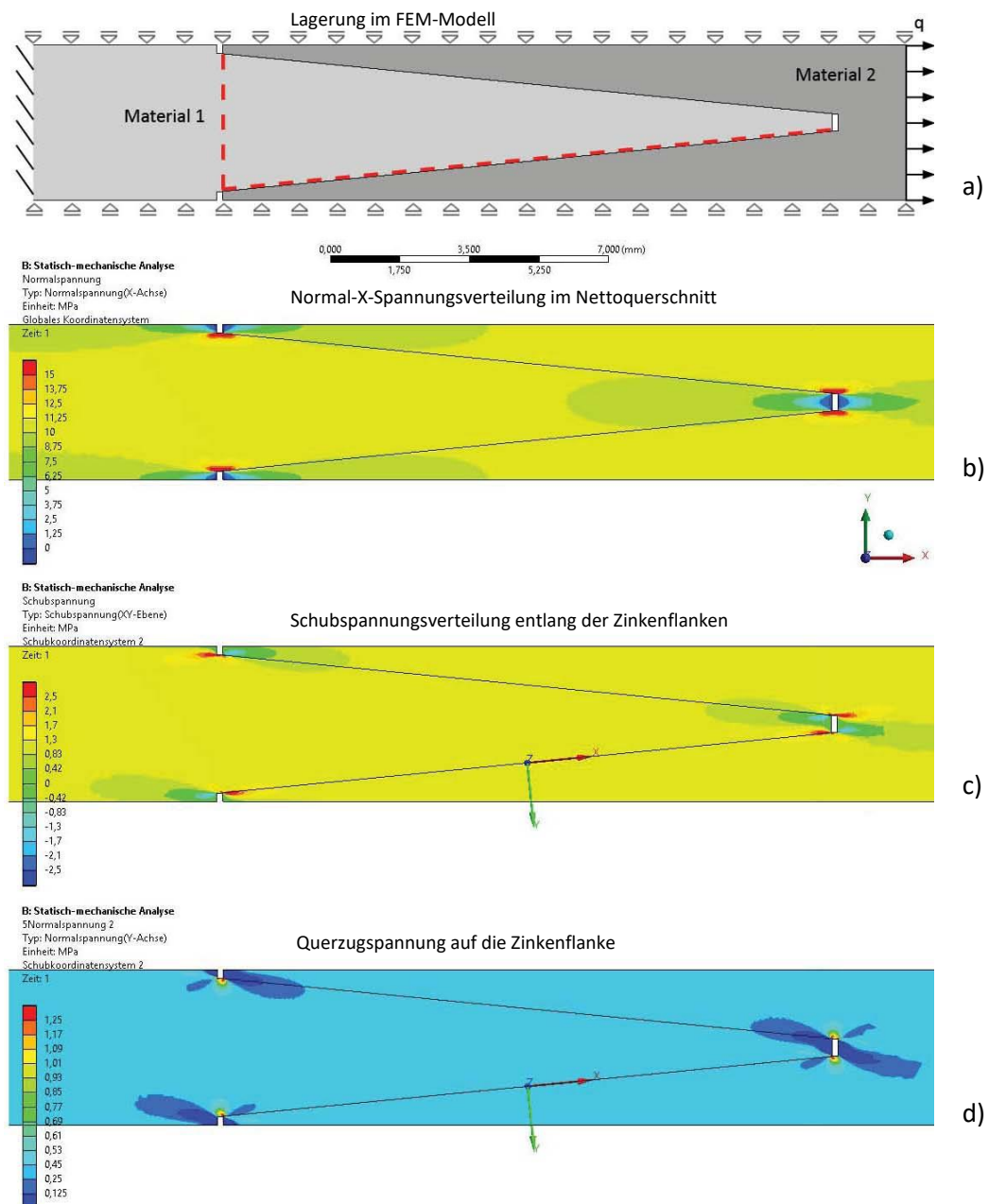
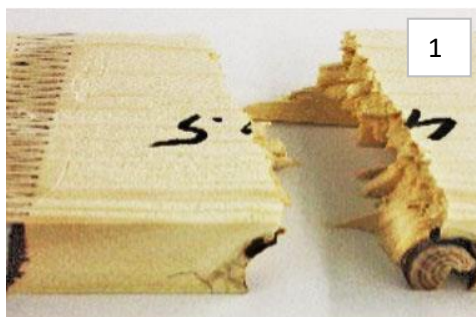


Abbildung 71: Spannungsverteilung in einer Keilzinkenverbindung des Typs I-15; $q = 10 \text{ N/mm}^2$; Material: Fichte

Die FEM - Analysen zeigen sowohl für die Normal-X-Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt (vgl. Abbildung 71, b)), für die Schubspannungsverteilung entlang der Zinkenflanke (vgl. Abbildung 71, c)) als auch der Querzugspannungsverteilung entlang der Zinkenflanke (vgl. Abbildung 71, d)), Spannungskonzentrationen im Bereich des Zinkengrundes, die die Spannungen im übrigen Bereich um ein Vielfaches übersteigen. Der Bruch im Nettoquerschnitt wird durch die Normal-X-Spannungsspitzen im Bereich des Zinkengrundes ausgelöst, der Bruch der Klebstofffuge durch Schubspannungsspitzen und Querzugspannungsspitzen am Anfang und am Ende der Klebfuge.

4.2.4 Bruchbild und Versagensursachen

Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen zeigen vier unterschiedliche Bruchbilder:



Bruchbild 1: Versagen des Prüfkörpers außerhalb der Keilzinkenverbindung. Die Keilzinkenverbindung bleibt intakt.



Bruchbild 2: Versagen des Prüfkörpers im Nettoquerschnitt der Keilzinkenverbindung. Die Klebfuge der Keilzinkenverbindung bleibt intakt.



Bruchbild 3: Versagen des Prüfkörpers in der Klebfuge der Keilzinkenverbindung, als Adhäsions- (3.1) oder Kohäsionsbruch (3.2). Der Nettoquerschnitt der Keilzinkenverbindung bleibt intakt.



Bruchbild 4: Versagen des Prüfkörpers als Flankenbruch der Keilzinkenspitze neben der eigentlichen Klebfuge der Keilzinkenverbindung. Die Klebstofffuge bleibt intakt.

Die Bruchbilder können auch kombiniert auftreten.

Abbildung 72: Bruchbilder an Keilzinkenverbindungen

4.2.4.1 Interpretation der Bruchbilder

Um die Leistungsfähigkeit einer Keilzinkenverbindung zu bewerten, müssen die Ursachen für deren Versagen verstanden und Parameter ausfindig gemacht werden, die das Versagen auslösen. Für die Interpretation der Bruchbilder gemäß Abbildung 72 soll davon ausgegangen werden, dass Klebstofffestigkeiten, Zinkenprofil, Holzfeuchte und Prozessparameter, wie Klebstoffmenge, Pressdruck und Presszeit, gleich sind. Eine Änderung eines einzigen der aufgeführten Parameter kann zu einer unmittelbaren Veränderung der Bruchbilder, bei ansonsten gleichem Versuchsaufbau, führen.

Bruchbild 1 stellt kein Versagen der Keilzinkenverbindung, sondern ein Versagen des Holzes im Astbereich dar. Hier liegt die Festigkeit des Prüfkörpers im Bereich der Keilzinkung oberhalb der Holzfestigkeit im Bereich der Fehlstelle (Ast). Das Bruchbild tritt vorwiegend unter Verwendung stark astiger Holzquerschnitte, unabhängig ob Nadel- (z. B. Sortierklasse S7) oder Laubholz (z. B. Sortierklasse LS7), auf. Die Leistungsfähigkeit der Keilzinkenverbindung wird nicht erreicht. Die Festigkeit des Prüfkörpers fällt sehr gering aus.

Bruchbild 2 tritt ein, wenn die Holzfestigkeit im Nettoquerschnitt überschritten wird. Der Bruch wird durch Spannungsspitzen am Zinkengrund ausgelöst (vgl. Abbildung 71, b)) und breitet sich ins Innere der Zinken im Bereich des Nettoquerschnitts aus. Das Bruchbild stellt sich unter Verwendung von Hölzern - in erster Linie Nadelhölzern - mit geringem Astanteil und mittlerer Holzfestigkeit ein.

Bruchbild 3 tritt dann auf, wenn qualitativ hochwertige Holzquerschnitte, also Querschnitte mit sehr geringem Fehleranteil und hoher Festigkeit – in erster Linie Laubholz - verklebt werden. Charakteristisch für dieses Bruchbild ist das Lösen der Keilzinkenverbindung bei intaktem Holzquerschnitt. Der Bruch wird durch Spannungsspitzen innerhalb der Klebfuge und damit durch Klebstoffversagen ausgelöst (vgl. Abbildung 71, c) und d)), und breitet sich entlang der Klebfuge aus. Bruchbild 3 kann sowohl durch Adhäsions- als auch durch Kohäsionsversagen des Klebstoffs ausgelöst werden.

Bruchbild 4 tritt auf, wenn die Holzfasern bezogen auf die Prüfkörper abweichen und die Querzugfestigkeit und oder Scherfestigkeit des Holzes überschritten wird. Das Bruchbild konnte im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich an keilgezinktem Buchenholz beobachtet werden.

Grundsätzlich können zwei Hauptauslöser (vgl. Abbildung 73; grün / blau, S. 74) für das Versagen einer Keilzinkenverbindung definiert werden. Sofern die Klebstofffuge intakt bleibt (Bruchbild 1, 2 und 4), wird das Versagen durch Überschreitung der Werkstofffestigkeit ausgelöst; sofern die Holzquerschnitte intakt bleiben, wird das Versagen durch die Überschreitung der Klebstofffestigkeit ausgelöst (Bruchbild 3) (vgl. Abbildung 73).

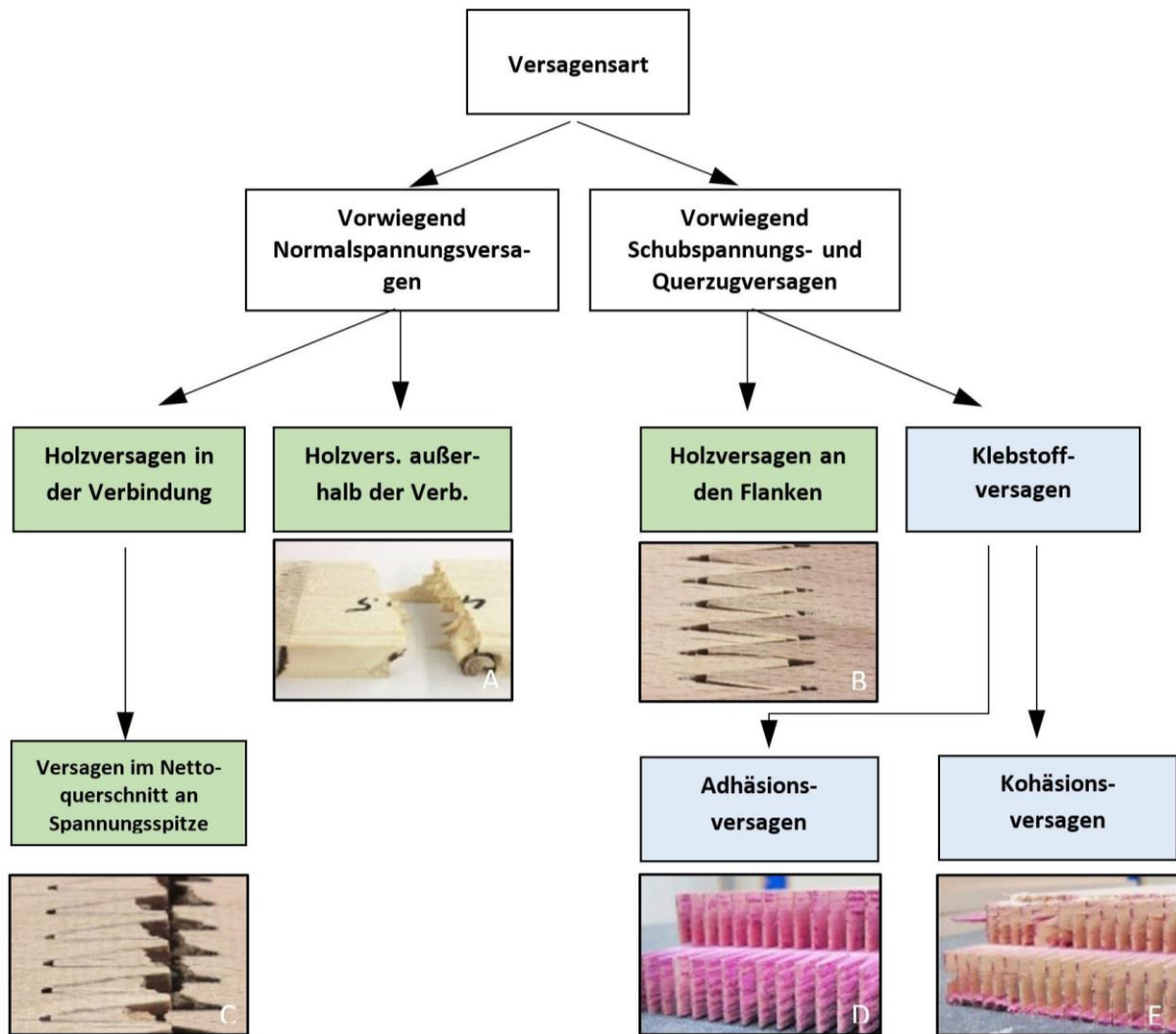


Abbildung 73: Schema der Versagensarten von Keilzinkenverbindungen: Hauptspannung und Bruchauslöser ¹⁶

4.2.5 Ansätze zur Optimierung

Wird das Versagen der Keilzinkenverbindung durch das Holz ausgelöst, kann entweder die Holzqualität durch engere Sortierkriterien, wie beispielsweise einem geringeren Astanteil, einer höheren Dichte, einer geringeren Faserabweichung etc. gesteigert oder aber auch die Spannungsspitzen, durch die Wahl eines geeigneten Fräsprofils, minimiert werden.

Wird das Versagen der Keilzinkenverbindung durch den Klebstoff ausgelöst, so kann auch hier, durch die Reduktion der Spannungsspitzen infolge der Verwendung optimierter Fräsprofile, die Festigkeit gesteigert werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob der Bruch durch Kohäsionsversagen oder Adhäsionsversagen ausgelöst worden ist. Liegt Kohäsionsversagen vor, kann eine Optimierung durch festere Klebstoffe erfolgen. Bei Adhäsionsversagen kann die Bearbeitung der Füge-teiloberfläche (z. B. mittels Primer) oder durch leistungsfähigere Klebstoffe zu einer Leistungssteigerung der Klebverbindung beitragen.

¹⁶ Bilder A, B, C sind eigene Abbildungen. Die Bilder D, E sind aus Franke et al., (2013, S. 42); diese Bilder wurden zugeschnitten.

4.2.6 Einflussfaktoren auf die Festigkeit der Keilzinkenverbindung

In Kap. 4.2.6.1 bis Kap. 4.2.6.7 werden unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen vorgestellt und deren Einfluss quantifiziert. Dabei werden sowohl publizierte Forschungserkenntnisse dritter als auch Ergebnisse eigener Untersuchungen, die während meiner bisherigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut *Tragwerk und Material* durchgeführt worden sind, dargestellt. Diese Untersuchungen wurden entweder im Rahmen der im Vorwort aufgeführten Forschungsprojekte durchgeführt oder es handelt sich um weiterführende Untersuchungsreihen ohne einen direkten Projektbezug.

Grundsätzlich ist es kaum möglich, das Datenmaterial publizierter Forschungsergebnisse aus mechanischen Untersuchungen zur Keilzinkenverbindung miteinander zu vergleichen. Bereits kleine Unterschiede im Prüfverfahren (Prüfgeschwindigkeit, Systemtyp), am Verfahren zur Herstellung der Prüfkörper (Alter der Fräswerkzeuge, Umdrehungszahl, Vorschubgeschwindigkeit, Holzfeuchte, Klebstoff und Klebstoffapplikation: Klebstoffmenge und Pressdruck) wie auch der Prüfkörper selbst (Holzart, Dichte, Elastizitätsmodul, Abmessungen = Size - Effekt), führen zu teilweise großen Abweichungen der Ergebnisse und verhindern einen absoluten Vergleich ebendieser. Aus diesem Grund werden jeweils die Ergebnisse von ein und demselben Autor aufgeführt. Sofern möglich, werden stichpunktartig die Randbedingungen der Versuchsdurchführung skizziert. Die Ergebnisse werden nicht unmittelbar mit Ergebnissen weiterer Autoren verglichen, um ggf. Fehlinterpretationen infolge unterschiedlicher Randbedingungen zu vermeiden.

Es ist nicht bekannt, dass bislang - außerhalb des T-Labs der TU Kaiserslautern - Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Holz und KP sowie zwischen KP und KP durchgeführt worden sind. Aus diesem Grund wurde zunächst das Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen an zwei unterschiedlichen Zinkenprofilen unter stationären klimatischen Bedingungen sowohl bei der Herstellung als auch bei der Prüfung (Normalklima) untersucht, um erste Kennwerte für die hybride Verbindung zu ermitteln. Hygroskopische Untersuchungen an nativem Holz und an KP (Kap. 3.3.1, S. 42 ff.) haben gezeigt, dass die beiden Materialien völlig unterschiedlich auf Veränderungen des klimatischen Umfeldes, insbesondere der Luftfeuchtigkeit, reagieren. Aus diesem Grund wurden weiterführende Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Fichtenholz und KP durchgeführt, die die Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf das Festigkeitsverhalten der Klebverbindungen quantifizieren.

Um die Leistungsfähigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP gegenüber nativem Nadelholz und nativem Nadelholz zu bewerten, wurden jeweils Referenzuntersuchungen an keilgezinkten Querschnitten aus nativem Nadelholz durchgeführt. Die Ergebnisse sind nicht als absolute Ergebnisse, sondern als vergleichende und damit qualitative Ergebnisse zu verstehen, die die Abhängigkeit des innerhalb des Prüfverfahrens veränderten Parameters auf das Festigkeitsniveau der Verbindung beschreiben.

Der Übersichtlichkeit halber werden die einzelnen Faktoren, die die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung beeinflussen sowie deren Einflussgröße zunächst graphisch wie auch tabellarisch aufgeführt (vgl. S. 76) und im Anschluss daran kurz vorgestellt. In den Kapiteln 4.2.6.1 bis 4.2.6.7 wird der Wissensstand zu jedem dieser Faktoren dann detailliert beschrieben.

Wie eine Kette, deren schwächstes Glied die Tragfähigkeit des Gesamtsystems bestimmt, bestimmen die einzelnen aufgeführten Faktoren die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung. In Abbildung 74 wird der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren auf das Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen veranschaulicht. Dabei haben Kettenglieder mit geringem Durchmesser größeren Einfluss auf das Tragverhalten als Kettenglieder mit großem Durchmesser.

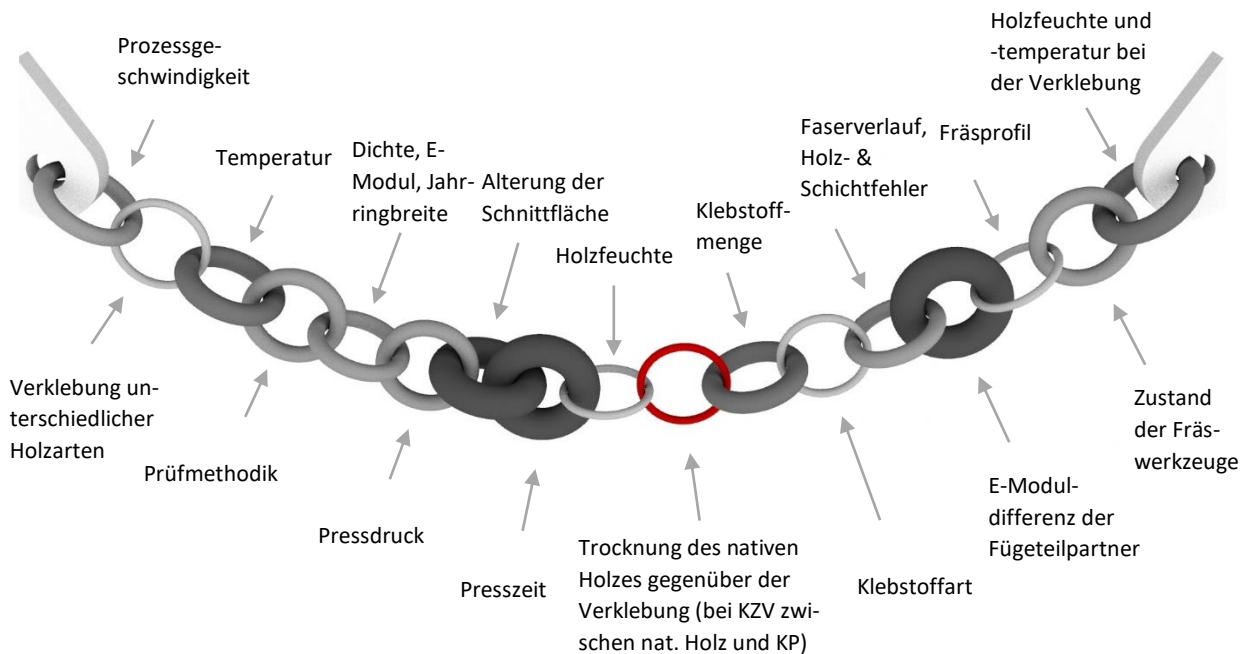


Abbildung 74: Einflussfaktoren auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung

Tabelle 7: Tabellarische Zusammenfassung der Einflussfaktoren sowie deren Gewichtung

starker Einfluss	mittelstarker Einfluss	geringer Einfluss	kein Einfluss
Keilzinkengeometrie	Dichte, E-Modul, Jahrringbreite	Temperatur	E-Modul-differenz der Fügeteilpartner
Klebstoff	Pressdruck	Klebstoffmenge	Presszeit
Holzfeuchte	Faserverlauf, Holz- und Schichtfehler	Holzfeuchte und -temperatur bei der Verklebung	Alterung der Schnittfläche
Trocknung des nativen Holzes gegenüber der Verklebung *	Prüfmethode		
Verklebung unterschiedlicher Holzarten	Zustand der Fräswerkzeuge		
	Prozessgeschwindigkeit		

* nur in einer KZV zwischen nativem Holz und KP

➤ Faktoren, die keinen Einfluss auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung zeigen

Die *Presszeit* (Kap. 4.2.6.3.3, S. 88) und etwaige *Elastizitätsmodul*differenzen der *Fügeteilpartner* (Kap. 4.2.6.6.2, S. 100) haben keinen signifikanten Einfluss auf die Tragfähigkeit einer Keilzinkenverbindung. Ein Einfluss der *Alterung der Schnittflächen* (Kap. 4.2.6.3.7, S. 93) auf die Klebeigenschaften kann für natives Holz zwar nachgewiesen werden, spielt jedoch in der automatisierten Herstellung von Keilzinkenverbindungen keine Rolle, da die Querschnitte unmittelbar nach dem Fräsen verklebt werden und sich somit eine Alterung der Schnittfläche nicht einstellt.

➤ Faktoren, die einen starken Einfluss auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung zeigen

Die *Keilzinkengeometrie* (Kap. 4.2.6.1, S. 79), die *Klebstoffart* (Kap. 4.2.6.4, S. 95) und die *Holzfeuchte* (Kap. 4.2.6.7.2, S. 108) haben nachweislich einen großen Einfluss auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen. An Keilzinkengeometrien mit geringem Verschwächungsgrad (z. B. Typ I-15 oder I20-m) zeigten sich deutlich höhere Keilzinkenfestigkeit als an Keilzinkengeometrien mit verhältnismäßig großem Verschwächungsgrad (z. B. Typ I-20). Der Verschwächungsgrad gibt das Verhältnis aus Bruttoquerschnittsfläche und Nettoquerschnittsfläche des Keilzinkenstoßes an. Über ihn kann die Spannungserhöhung im Bereich der Keilzinkenverbindung abgeschätzt werden, die als Bruchursache in Frage kommen kann.

Besonders hohe Keilzinkenfestigkeiten konnten mit MUF- und mit PRF-Klebstoffen erzielt werden, während mit PU-Klebstoffen tendenziell geringere Festigkeiten erreicht werden konnten, was auf die geringere Festigkeit von PU-Klebstoffen im Vergleich zu den beiden anderen Klebstoffgruppen zurückzuführen ist.

Da sich die Holzfeuchte unmittelbar auf die Festigkeit und die Steifigkeit von Holz und Holzwerkstoffen auswirkt, sinkt die Keilzinkenfestigkeit mit Zunahme der Holzfeuchte und bis zum Erreichen des Fasersättigungspunktes ebenfalls.

Ein besonderer Einflussfaktor, der ausschließlich in Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Holz und KP zum Tragen kommt, ist die *Trocknung* (Kap. 4.2.6.7.2, S. 108) des nativen Holzes, die zum Schwinden ebendiesem und - infolge einer blockierten Schwindverformung - zur Rissbildung innerhalb der Klebfuge führt. Insofern zählt die *Verklebung unterschiedlicher Holzarten* zu den starken Einflussfaktoren, sofern sich ihre mechanischen und insbesondere ihre hygroskopischen Eigenschaften stark unterscheiden. Ein Lösungsansatz zur Begrenzung der Wirkung der Trocknung wird eigens in Kapitel 4.2.7, S. 123 diskutiert.

➤ Faktoren, die einen mittelstarken Einfluss auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung zeigen

Bei verschiedenen Einflussfaktoren kann ein Festigkeitsoptimum durch exakte Steuerung des jeweiligen Einflussfaktors erzielt werden. In Abhängigkeit des Materials der Fügeteilpartner, der Zinkengeometrie und des Klebstoffs lässt sich beispielsweise ein optimaler *Anfangspressdruck* (Kap. 4.2.6.3.2, S. 88) bei der Verklebung bestimmen. Wird dieser unterschritten, verteilt sich der Klebstoff nicht gleichmäßig innerhalb der Klebfuge und es bildet sich keine optimale Klebstoffschicht aus. Bei einer Überschreitung des Pressdrucks wird zu viel Klebstoff aus der Klebfuge gepresst. Die sich zwischen den Schnittflächen befindliche Restmenge an Klebstoff reicht dann nicht aus, um die Fügeteiloberflächen optimal mit einander zu verbinden.

Die größtmögliche Keilzinkenfestigkeit wird dann erreicht, wenn im Bereich der Keilzinkenverbindung keine Störungen im *Faserverlauf* (Kap. 4.2.6.3.8, S. 94), z. B. Äste vorhanden sind und die Fasern exakt in Richtung der Zinkenachse orientiert sind. Störungen des Faserverlaufes sind neben der *Holzdichte* (Kap. 4.2.6.6, S. 97) und neben dem *Elastizitätsmodul* (Kap. 4.2.6.6, S. 97) - deren beider Steigerung zu

einer Steigerung der Keilzinkenfestigkeit führt - sogenannte Sortierkriterien, die bei einer Sortierung nach DIN 4074-1:2012-06 angesetzt werden. Auch Störungen im Aufbau des KPs, z. B. Schichtfehler in Form von Furnierüberlappungen, führen zu einem Abfall der Keilzinkenfestigkeit bei Keilzinkenverbindungen zwischen KP und nativem Holz.

Weiterhin konnte beobachtet werden, dass mit Zunahme der *Prüfgeschwindigkeit* (Kap. 4.2.6.2.2, S. 86) die Festigkeit der Keilzinkenverbindung steigt. Diese Beobachtung lässt sich damit erklären, dass sich bei schnellem Spannungsaufbau keine Kriecheffekte einstellen, die zum Abfall der Keilzinkenfestigkeit führen. Um die Ergebnisse von Materialprüfungen mit einander vergleichen zu können, wurde normübergreifend ein Standard-Test definiert, bei dem der Bruch nach 300 Sekunden \pm 60 Sekunden eintreten soll. Kennwerte außerhalb dieses Intervalls sind ggf. entsprechend zu korrigieren.

Aufgrund der unmittelbaren Einflussnahme durch entsprechende Sortierung der Hölzer und der Steuerung der Herstellungsparameter sowie der Parameter der Materialprüfung, werden der *Pressdruck*, die *Prüfgeschwindigkeit* und der *Faserverlauf* den Faktoren zugeordnet, die einen mittelstarken Einfluss auf die Keilzinkenfestigkeit zeigen. Obwohl der Elastizitätsmodul als auch die Dichte ansich die Keilzinkenfestigkeit stark beeinflussen, bleibt das Verhältnis aus Festigkeit des ungeschwächten Querschnitts und der Festigkeit der Keilzinkenverbindung jedoch etwa gleich (Kap. 4.2.6.1, S. 81); aus diesem Grund werden Dichte und Elastizitätsmodul ebenfalls den Faktoren mit mittelstarkem Einfluss zugeordnet.

Als weiterer Faktor, der einen mittelstarken Einfluss auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen hat, ist ferner die *Alterung der Fräswerkzeuge* (Kap. 4.2.6.3.5, S. 92) zu nennen. Mit steigender Laufzeit der Fräswerkzeuge sinkt die Schärfe der Schneiden, was zu einer Zellschädigung im Bereich der Schnittflanken führt und die Festigkeit der Keilzinkenverbindung verringert. Ist die Standzeit der Fräser erreicht, sind diese deshalb zu tauschen.

Auch die *Prozessparameter Vorschubgeschwindigkeit* und *Umdrehungszahl* zählen zu den mittelstarken Faktoren, da sie die Qualität der Schnittkanten der Keilzinkenflanken und dadurch die Festigkeit der Keilzinkenverbindung beeinflussen (Kap. 4.2.6.3.4, S. 91).

➤ Faktoren, die einen geringen Einfluss auf die Festigkeit einer Keilzinkenverbindung zeigen

Weiterhin sind Faktoren zu nennen, die sich nur geringfügig auf die Keilzinkenfestigkeit auswirken, so z. B. die *Klebstoffmenge* (Kap. 4.2.6.3.1, S. 87), für die ein Mindestwert definiert sein muss. Größere Mengen an Klebstoff werden beim Fügen der Fügeteilpartner aus der Klebfuge gepresst und wirken sich damit nicht festigkeitsmindernd auf die Keilzinkenverbindung aus. Auch die *Temperatur* (Kap. 4.2.6.7.1, S. 108) hat im baupraktischen Einsatz einen geringen Einfluss auf die Festigkeit sowie die Steifigkeit von Holz und Holzwerkstoffen und damit auch auf die Keilzinkenfestigkeit.

Weiterhin zählen die *Holzfeuchte* als auch die *Holztemperatur* bei der Verklebung zu den Faktoren, die einen geringen Einfluss auf die Keilzinkenfestigkeit haben, sofern das Holz vor der Verklebung einer Trocknung unterzogen wurde und die Holzfeuchte zwischen $u = 10\%$ und $u = 20\%$ liegt. In diesem Grenzbereich wirken sich die beiden Faktoren mehr oder weniger stark auf die Abbundzeit der Klebstoffe aus (Kap. 4.2.6.3.6, S. 93).

Bis auf den Faktor der Holztrocknung ist der Einfluss der oben aufgeführten Faktoren auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen nativen Hölzern und von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Holz und Kunstharzpressholz jeweils ähnlich.

4.2.6.1 Einfluss des Fräsprofils

Die Keilzinkenverbindung wurde in den 40-er Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und steht im Zusammenhang verschiedener Versuchsreihen von Graf & Egner (1938), die das Tragfähigkeitsverhalten von in Längsrichtung auf Zug und auf Druck beanspruchter geleimter, zweischnittiger Laschenverbindungen aus Holz untersuchten. „Diese Versuchsreihe dürfte der Beginn der Keilzinkung gewesen sein.“ (Pertschi, 2006, S. 32)

Aus ihren Erkenntnissen leitete Egner eine Laschenverbindung mit abgeschrägten Enden der Laschen und des Mittelholzes ab. Mit der Modifikation der Lasche zur *Schiftzinkung* konnte die Bruchlast um etwa 75 % gesteigert werden (Hartmann, 1939).

Die Erstausgabe der DIN 68140 (1960) sah noch relativ lange Zinkenlängen von 40 – 60 mm für tragende Holzbauteile vor. Diese Überlegung resultierte daher, dass man glaubte, dass in erster Linie die Zunahme der Klebfläche zur Steigerung der Keilzinkenfestigkeit beiträgt (Marian, 1968). Die Festigkeit der Zinkenverbindung hängt stattdessen vorrangig vom *Flankenneigungswinkel* und von der Breite der *Zinkenspitze* ab. Je flacher der Winkel ist, desto geringer sind die Scher- als auch die Querkräfte in der Klebfuge, im Vergleich zu den Kräften in Faserlängsrichtung (vgl. Kap. 4.2). Im Bereich der Zinkenspitze kommt es über die Breite der Spitze zu keiner festen Verklebung mit dem Nachbarholz, da dort Stirnholzfläche auf Stirnholzfläche stumpf stößt und geklebte Stirnholzstöße nach Marian (1968) nicht zu verwirklichen sind. Die volle Querschnittsfläche der mit einer Keilzinkung verbundenen Hölzer, kann somit nicht zur Übertragung der Kräfte angesetzt werden, sondern lediglich die Nettoquerschnitte am Zinkengrund. Mit ausreichend kleinem Flankenneigungswinkel ist ausschließlich die Zinkenspitzenbreite b_t für die Festigkeit der Klebverbindung ausschlaggebend (vgl. Kap. 4.2).

Der nominelle Wirkungsgrad aktuell eingesetzter Keilzinkenprofile liegt zwischen 84 % und 90 %. Die für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen normierten Profile können der Tabelle 8 entnommen werden.

Tabelle 8: Zulässige Profile für die Herstellung von Holz oder Holzwerkstoffen

Profil	I-10	I-15	I-20m	I-20	I-30	I-32	I-50
Norm	DIN EN 385	DIN EN 15497 DIN EN 385	DIN EN 15497 DIN EN 385	DIN EN 15497 DIN EN 385	DIN EN 15497	DIN EN 385	DIN EN 387
Verwendung	BH. f. trag. Zw.	keilgezinktes VH + BH f. trag. Zw.	keilgezinktes VH + BH f. trag. Zw.	keilgezinktes VH + BH f. trag. Zw.	keilgezinktes VH	BH. f. trag. Zw.	Universal-KZV
BSH-Lamelle	empfohlen	empfohlen	empfohlen	empfohlen	/	empfohlen	/
Universal-KZV	/	/	/	/	/	/	empfohlen
Zinkenlänge l_j [mm]	10	15	20	20	30	32	50
Zinkenteilung p [mm]	3,7	3,8	5	6,2	6,2	6,2	12
Spitzenbreite b_t [mm]	0,6	0,42	0,5	1	0,6	1	2
Flankenneigung [°]	7,13	5,63	5,71	5,99	4,76	3,75	4,57
Flankenneigung [%]	12,50	9,87	10,00	10,50	8,33	6,56	8,00
Red. Faktor	0,16	0,11	0,10	0,16	0,10	0,16	0,17

Eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Umfrage unter 45 deutschen Brettschichtholzherstellern ergab, dass mittlerweile nahezu alle Betriebe das Vorzugsprofil I-15 einsetzen (Stand 2017).

Spannungsverlauf in der Keilzinke

Spannungsspitzen im Zinkengrund als auch Spannungsspitzen am Anfang und Ende der Klebefuge (vgl. Kap. 4.2.3, S. 68 ff.) beeinflussen die Leistungsfähigkeit von Keilzinkenverbindungen. Die Spannungsspitzen variieren in Abhängigkeit des Zinkenprofils stark voneinander. Aicher & Klöck (1990) untersuchten die Leistungsfähigkeit fünf verschiedener Keilzinkenprofile, indem sie die Spannungsverläufe im Bereich der Klebfuge durch FE-Simulation bestimmten. Am besten stuften sie das Zinkenprofil I-30 ein, gefolgt von den Profilen I-20m und I-15, die in etwa gleichauf lagen. Am schlechtesten wurden die Profile I-20 und I-10 bewertet.

Nachfolgend werden die Festigkeitseigenschaften der für die Herstellung von keilgezinktem Vollholz zulässigen Fräsprofile stichpunktartig verglichen. Der Vergleich beruht auf Publikationen und eigenen Forschungsergebnissen.

Profile I-20 und I-20 m (Nadelholz)

Das Profil I-20m stellt eine Weiterentwicklung des I-20 Profils dar. Bei gleicher Zinkenlänge fällt die Breite der Zinkenspitze, die Zinkenteilung und die Flankenneigung geringer aus. Mit 10 % ist der nominelle Verschwächungsgrad äußerst gering.

Aicher & Radovic (1999) untersuchten die Leistungsfähigkeit der beiden Profile in Nadelholz unter der Verwendung eines Melaminklebstoffs mit dem Ergebnis, dass sich mit dem Profil I-20m 25 % höhere Festigkeiten gegenüber dem Profil I-20 erzielen lassen.

Profile I-20, I-15 und I-7,5 (Pappelholz)

Castro & Paganini (1997) verglichen den Wirkungsgrad unterschiedlicher Keilzinkenprofile an Pappelholz unter Verwendung von Aeroduxklebstoff. Die Ergebnisse können Abbildung 75 und Tabelle 9 entnommen werden. Sie stellten fest, dass bei der Verklebung von Pappelholz das Vorzugsprofil I-7,5 mm mit 84 % den höchsten effektiven Wirkungsgrad aufweist.

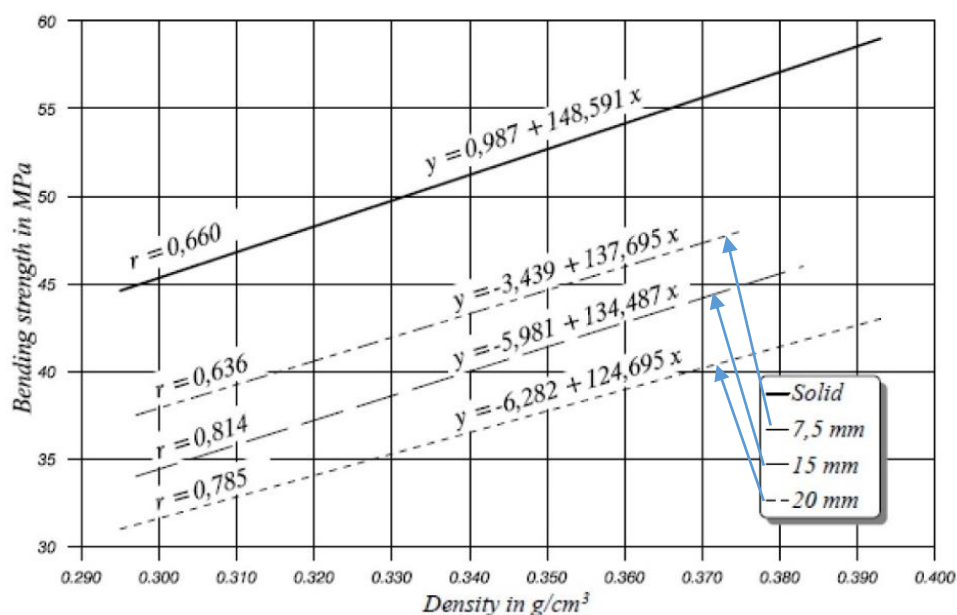


Abbildung 75: Wirkungsgrad unterschiedlicher Keilzinkenprofile. Holzart Pappel; Klebstoff Aerodux, Profil 7,5: $l = 7,5 \text{ mm} / p = 2,5 \text{ mm} / t = 0,2 \text{ mm}$; Profil 15: $l = 15 \text{ mm} / p = 3,8 \text{ mm} / t = 0,6 \text{ mm}$; Profil 20: $l = 20 \text{ mm} / p = 6,2 \text{ mm} / t = 1 \text{ mm}$

Die Versuche von Castro & Paganini (1997) zeigen, dass die mechanische Schwächung einer Keilzinkenverbindung etwa doppelt so groß ist wie die geometrische Schwächung. Die vergleichsweise höhere mechanische Schwächung lässt sich durch die ungleichmäßige Spannungsverteilung mit Spannungsspitzen innerhalb der Keilzinkenverbindung erklären (vgl. Abbildung 71, S. 71).

Tabelle 9: Vergleich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Profiltypen. Holzart Pappel, Klebstoff Aerodux, auf Basis der Daten von Castro & Paganini (1997)

Pappel [0,35 g/cm ³]	Festigkeit $f_{m, \text{mean}}$ [N/mm ²]	Wirkungsgrad n effektiv	Wirkungsgrad n nominell	Verschw.-grad v
Vollquerschnitt	53,0	100 %	100 %	0 %
KZV-7,5	44,8	84 %	92 %	8 %
KZV-15	41,1	78 %	89 %	11 %
KZV-20	37,4	71 %	84 %	16 %

Profile I-15 ¹⁷

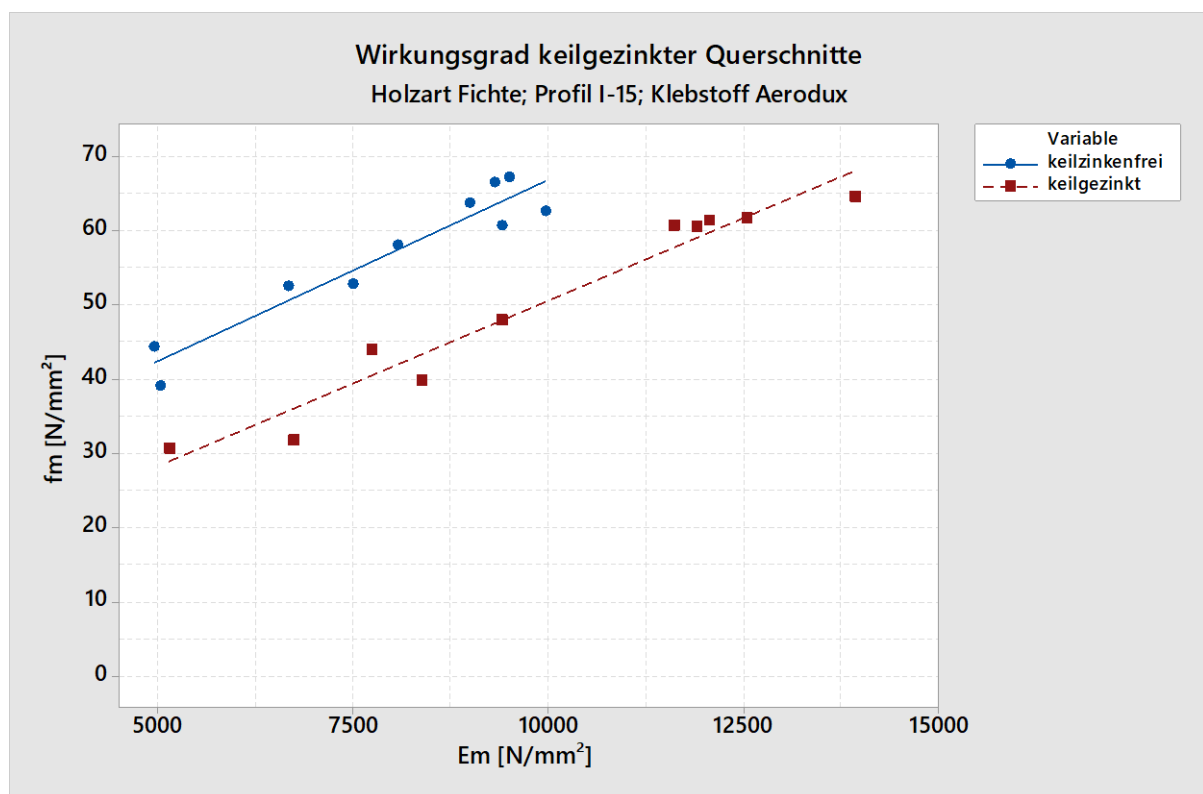


Abbildung 76: Wirkungsgrad keilgezinkter Querschnitte in Fichtenholz

Es wurden Biegeprüfungen an keilgezinkten Querschnitten aus Fichtenholz mit einer Keilzinkenverbindung I-15 durchgeführt. Die Keilzinkenverbindung wurde dabei jeweils an zwei Fügeteilpartnern mit gleichem Elastizitätsmodul realisiert. Die Prüfkörper wurden mit Aeroduxklebstoff unter einem Pressdruck von 10 N/mm² verklebt. Des Weiteren wurden Biegeuntersuchen an keilzinkenfreiem Fichtenholz durchgeführt. Im Vergleich zu keilzinkenfreien Querschnitten aus Fichtenholz zeigte sich an keilgezinktem Fichtenholz ein mit dem Biege-Elastizitätsmodul steigender Wirkungsgrad von 65 % bis >75 % (vgl. Abbildung 76).

¹⁷ vgl. Prüfungen im Anhang: Kap. 3.3.7, S. A-240

Profile I-20 und I-15 (Fichte / KP)¹⁸

Es wurden Zugprüfungen an keilgezinkten Querschnitten mit einem Fügeteilpartner aus nativem Fichtenholz und einem Fügeteilpartner aus KP durchgeführt. Hierbei kam sowohl das I-20 wie auch das I-15 Vorzugsprofil zum Einsatz. Verklebt wurden die Querschnitte jeweils mit Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018. Pressdrücke und Presszeiten wurden gemäß (DIN EN 15497, 2014) eingehalten. Die Zugprüfungen wurden in Anlehnung an (DIN 52188, 1979) durchgeführt. Die mittlere Dichte der Holzkollektive für beide Prüfungen war in etwa gleich. Die Holzfeuchte bei der Herstellung als auch bei der Prüfung betrug für beide Kollektive im Mittel ca. $u = 12\%$.

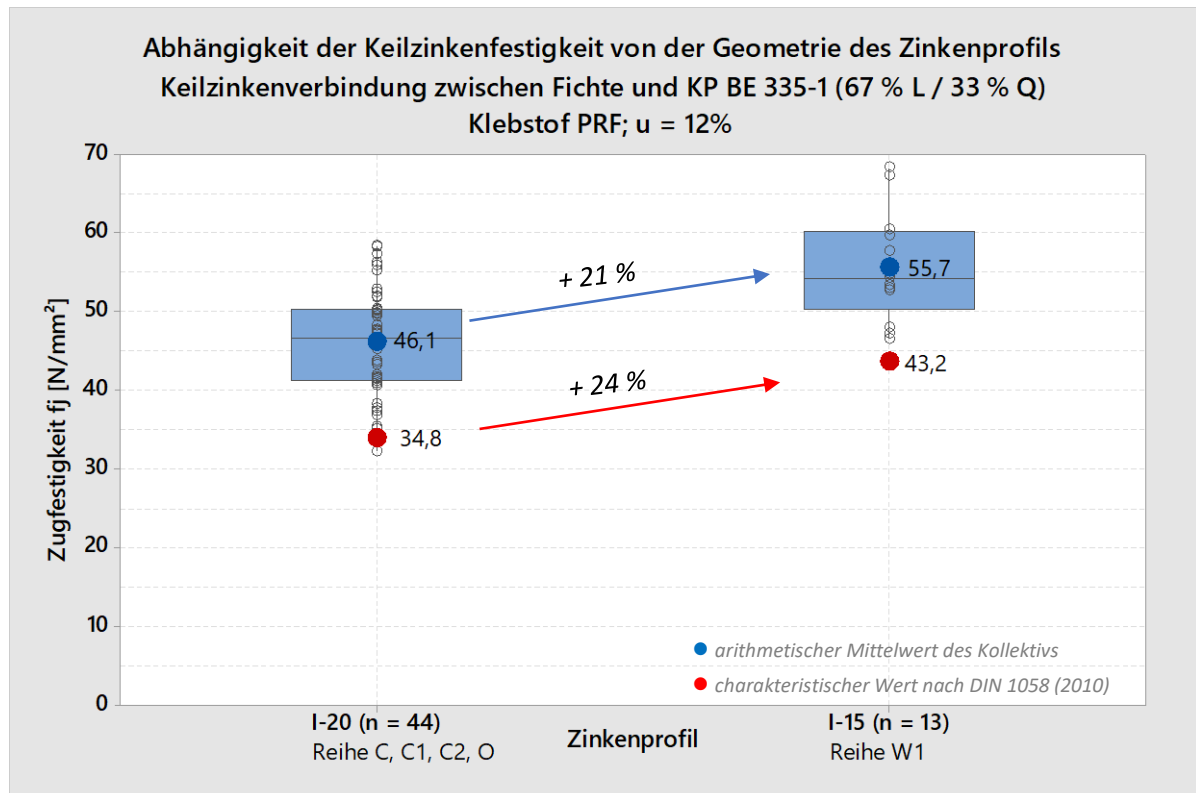


Abbildung 77: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Geometrie des Zinkenprofils

Es zeigte sich, dass sich gegenüber dem Vorzugsprofil I-20 mit einem Vorzugsprofil I-15 eine signifikant höhere Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung erzielen lässt. Ein Vergleich über die mittlere Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung belegt eine 21 % höhere Festigkeit des I-15 Vorzugsprofils gegenüber des I-20 Vorzugsprofils (vgl. Abbildung 77).

Offener und geschlossener Zinkengrund

Bei Keilzinkenverbindungen wird zwischen Fräsprofilen für *optische* und Fräsprofilen für *statisch beanspruchte* Verbindungen differenziert. Fräsprofile für optische Verbindungen werden für statisch weitgehend unbelasteten Querschnitte wie beispielsweise Möbel, Türen, oder Fensterrahmen verwendet. Bei diesen Keilzinkenverbindungen ist der Zinkengrund geschlossen, die Zinkenspitze liegt vollkommen

¹⁸ vgl. Prüfungen im Anhang: Kap. A-3.2.3, S. A-19 und Kap. A-3.2.5, S. A-22

am gegenüberliegenden Zinkengrund an (vgl. Abbildung 78, links). In statisch beanspruchten Keilzinkenverbindungen stößt die Zinkenspitze hingegen nicht gegen den Zinkengrund (vgl. Abbildung 78, rechts). Durch den offenen Zinkengrund kann gewährleistet werden, dass die zu fügenden Holzquerschnitte beim Pressen ausreichend tief ineinandergeschoben werden können und sich dadurch ein ausreichend hoher Flankenpressdruck beim Zusammenfügen der Bauteile einstellt. Dadurch werden Verklebungsfehler, z. B. infolge ungleichmäßiger Klebstoffverteilung und ungleichmäßiger Klebstoffschichtstärke minimiert. Darüber hinaus kann überschüssiger Klebstoff beim Zusammenpressen in den Zwischenraum zwischen Zinkenspitze und Zinkengrund gedrückt werden.



Abbildung 78: Links: geschlossener Zinkengrund,

rechts: offener Zinkengrund

Nach DIN EN 15497 (2014, S. 43) sollte das relative Zinkenspiel statisch beanspruchter Keilzinkenverbindungen $e = l_t/l_j \leq 0,08$ und $\geq 0,01$ betragen. Durch den innerhalb der Norm zulässigen oberen Grenzwert verändert sich der im Kenndatenblatt des jeweiligen Fräasers angegebene Verschwächungsgrad v , der am oberen Grenzwert dann größer ausfällt als er im Idealfall wäre. Aicher & Radovic (1999) differenzierten daher in den nominellen und den effektiven Verschwächungsgrad. „Das Zinkenspiel soll [. . .] so klein wie möglich sein, um die größte Festigkeit zu erreichen“ (Ivansson & Ström, 1968).

In Abbildung 79 ist links ein Fräsprofil für optische und mittig sowie rechts ein Fräsprofil für statisch wirksame Keilzinkenverbindungen dargestellt.

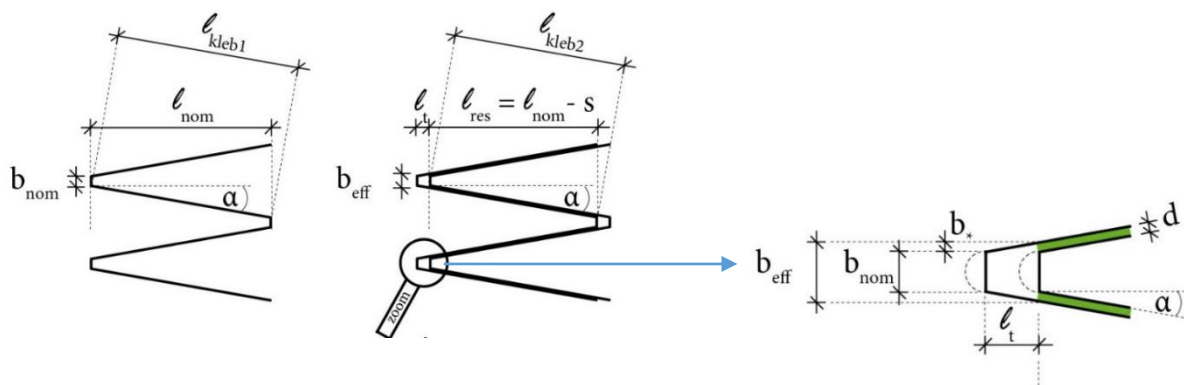


Abbildung 79: Gegenüberstellung von geschlossenem (links) und offenem Zinkengrund (Mitte und rechts), grün: Klebfuge

In Abhängigkeit der Klebfugenstärke d berechnet sich der effektive Verschwächungsgrad v_{eff} bei $e = 0,08$ dann wie folgt: (Aicher & Radovic, 1999)

$$v_{eff} = \frac{b_{eff}}{t},$$

mit $b_{eff} = b_{nom} + 2 \times b_*$ ermittelt werden.

Mit $b_* = \tan \alpha \times l_t$ ergibt sich der effektive Verschwächungsgrad zu:

$$v_{eff} = \frac{b_{nom} + 2 \times \tan \alpha \times l_t}{t}$$

Mit $l_{nom} = l_j$ ist $l_t = e \times l_{nom}$ und damit:

$$v_{eff} = \frac{b_{nom} + 2 \times \tan \alpha \times e \times l_{nom}}{t}$$

Tabelle 10 stellt den nominellen Verschwächungsgrad und den größten effektiven Verschwächungsgrad von verschiedenen Keilzinkenprofilen dar:

Tabelle 10: Gegenüberstellung des nominellen Reduktionsfaktors v_{nom} mit dem effektiven Reduktionsfaktor v_{eff} für $e = 0,08$

Profil	Zinkenlänge l [mm]	Zinkenteilung t [mm]	Zinkenspitze b [mm]	Reduktionsfaktor v_{nom}	Winkel α [°]	Reduktionsfaktor v_{eff}
I-10	10,0	3,8	0,6	0,16	7,4	0,21
I-15	15,0	3,8	0,42	0,11	5,6	0,17
I-20m	20,0	5,0	0,5	0,10	5,7	0,16
I-20	20,0	6,2	1,0	0,16	6,0	0,22
I-50	50,0	12,0	2,0	0,17	4,6	0,22

Unter Einhaltung der Normanforderung kann der effektive geometrische Verschwächungsgrad ein bis zwei Drittel oberhalb des nominellen liegen.

4.2.6.2 Einfluss der Belastungsrichtung und der Prüfmethodik

4.2.6.2.1 Belastungsrichtung ¹⁹

Keilzinkenverbindungen könne sowohl auf Zug, Druck und Biegung beansprucht werden. Die Festigkeit unterscheidet sich je nach Beanspruchungsart. In Abbildung 80, S. 85 werden die Druck- und Zugfestigkeiten von Keilzinkenverbindungen mit einem Zinkenprofil des Typs I-15 zwischen Fichte und KP gegenübergestellt. Die mittlere Druckfestigkeit liegt 13 % unterhalb der mittleren Zugfestigkeit. Hier ist zu beachten, dass die mittlere Dichte des nativen Holzes der Druckprüfkörper 14 % über der die mittlere Dichte des nativen Holzes der Zugprüfkörper lag.

Die Druckfestigkeit einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP kann mit nachfolgender Regressionsgleichung wiedergegeben werden.

$$f_c \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 0,868 + 88,46 \times p \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]^{20} \quad (\text{R-Qd } 81,51 \%)$$

¹⁹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.5, S. A-22, Reihe W1 und Kap. A-3.4.2, S. A-35

²⁰ p = Dichte Nadelholz

Bei einer Dichte von $0,477 \text{ g/cm}^3$, also der mittleren Dichte des Kollektivs, die der Zugprüfung unterzogen wurden, liegt die Druckfestigkeit bei $f_c = 43 \text{ N/mm}^2$ und damit 23 % unterhalb der Zugfestigkeit.

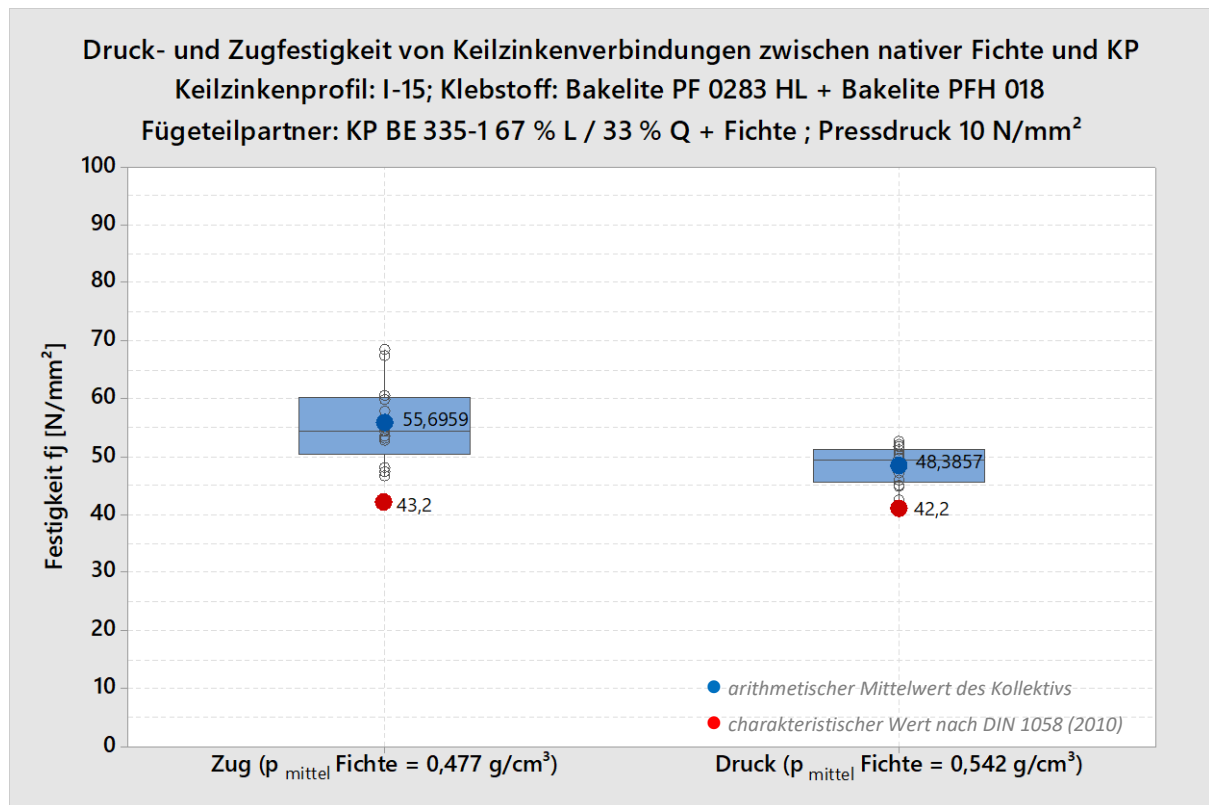


Abbildung 80: Druck- und Zugfestigkeit in Keilzinkenverbindungen

Die Versagensursache der Prüfkörper lag immer im Erreichen der Druckfestigkeit des nativen Holzes, was sich durch Druckfalten am Zinkengrund des nativen Holzes (vgl. Abbildung 81) zeigte.

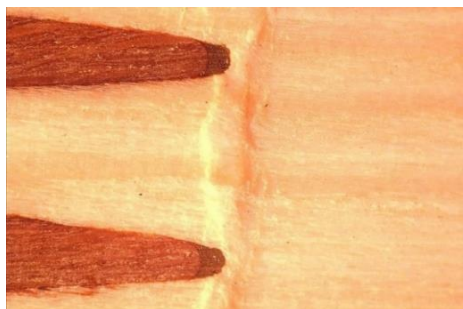


Abbildung 81: Versagen der Keilzinkenverbindung unter einer Druckbeanspruchung

Nach DIN 68364 (2003, S. 2) ist die Druckfestigkeit von Fichte bei einer Dichte von $0,46 \text{ g/cm}^3$ bei 45 N/mm^2 . Mit der zuvor hergeleiteten Regressionsgleichung lässt sich für die Dichte von $0,46 \text{ g/cm}^3$ eine Keilzinkenfestigkeit von $41,6 \text{ N/mm}^2$ ermitteln. Der Unterschied zwischen Druckfestigkeit des Holzes und der Druckfestigkeit der Keilzinkenverbindung liegt mit 8 % in etwa im Bereich des nominellen Verschwächtigungsgrades des Keilzinkenprofils I-15 mit 11 %. Der höhere Wirkungsgrad von Keilzinkenverbindungen unter einer Druckbeanspruchung im Vergleich zu Keilzinkenverbindungen unter einer Zugbeanspruchung rührt daher, dass Holz unter einer Druckbeanspruchung plastifiziert und Spannungsspitzen dadurch abgebaut werden. Aus diesem Grund tritt keine Verschlechterung der Keilzinkenfestigkeit durch Spannungsspitzen auf. Die Leistungsfähigkeit unter einer Druckbeanspruchung kann somit unmittelbar über den nominellen Verschwächtigungsgrad wiedergegeben werden.

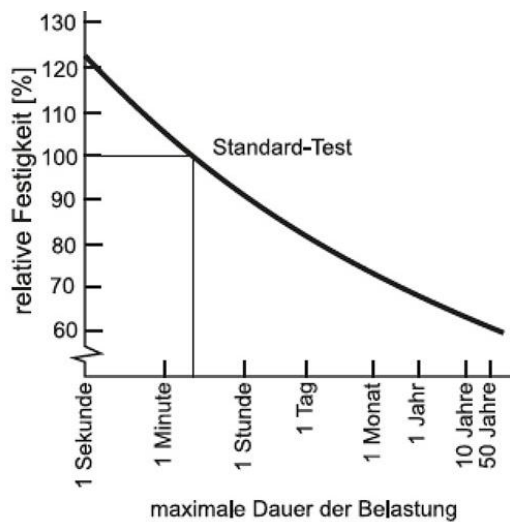


Abbildung 82: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Festigkeit

Für die Ermittlung von Festigkeitskennwerten ist in den jeweiligen Prüfnormen der Rahmen der Prüfdauer definiert. Im Standard-Test soll der Bruch nach 300 ± 60 Sekunden eintreten. Ergebnisse, die unter geringeren Belastungsdauern ermittelt wurden, sind nach (Bodig & Jayne, 1993, zitiert nach Niemz & Sonderegger, 2017, S. 352) tendenziell höher, die unter größeren Belastungsdauern ermittelt wurden, tendenziell geringer gegenüber den Ergebnissen, die unter der Normvorgabe ermittelt wurden. Dieser Zusammenhang wurde bislang noch nicht für das Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen nachgewiesen.

Um die Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit bei der Bestimmung von Festigkeitskennwerten von Keilzinkenverbindungen zu quantifizieren, wurden Biegeprüfungen ²¹ unter unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten durchgeführt.

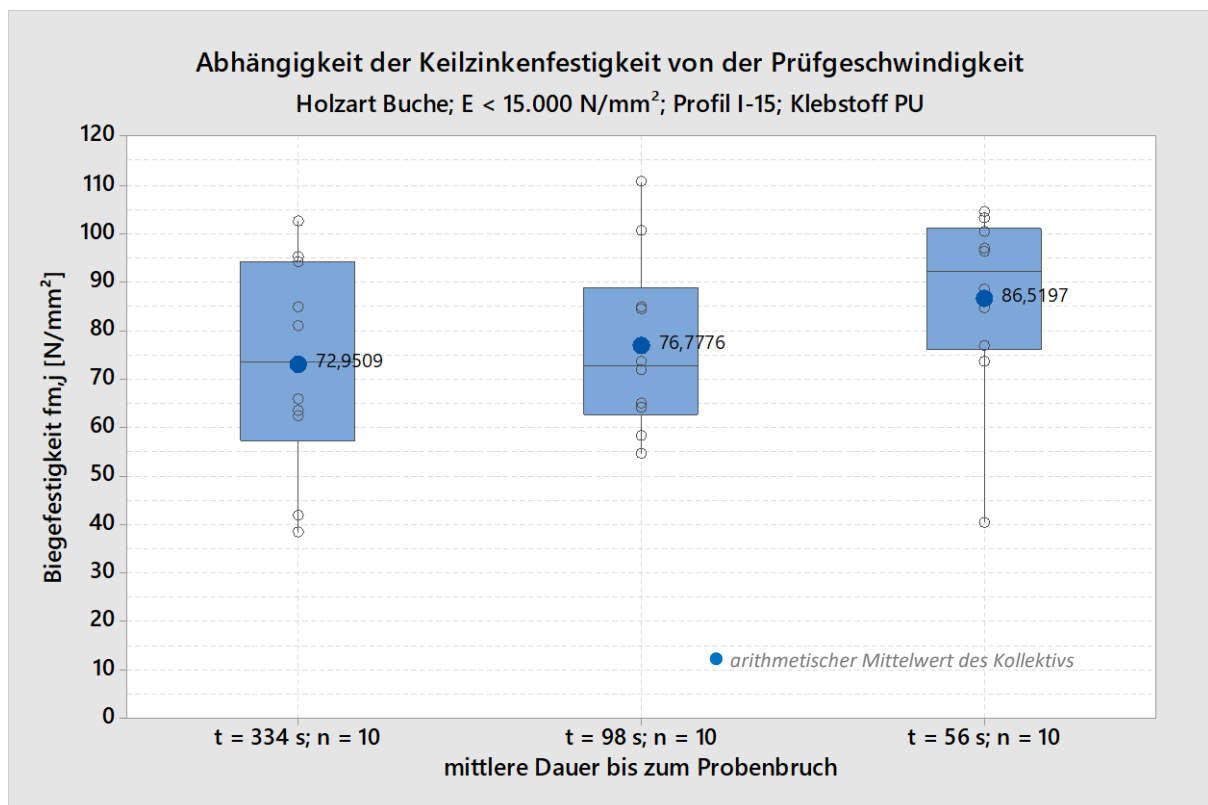


Abbildung 83: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Prüfgeschwindigkeit

²¹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. 3.3.4, S. A-28

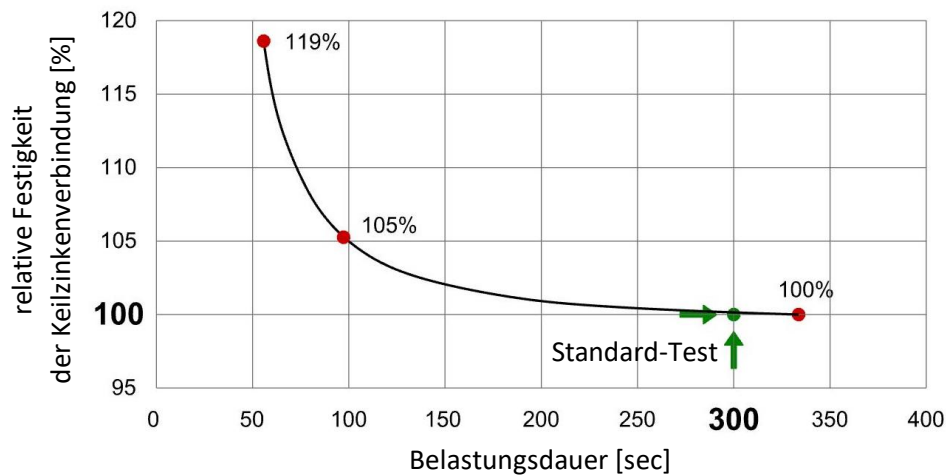


Abbildung 84: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung

Die Versuchsauswertung zeigt, dass die Keilzinkenfestigkeit durch die Prüfgeschwindigkeit beeinflusst wird. Kürzere Belastungsdauern von 100 Sekunden führen zu 5 % höheren Festigkeiten gegenüber den unter Normdauer durchgeführten Belastungsversuchen. Belastungsdauern von 60 Sekunden führen zu ca. 19 % höheren Ergebnissen (vgl. Abbildung 83, S. 86 und Abbildung 84). Da der Einfluss der Belastungsdauer im Bereich von 100 Sekunden bis 360 Sekunden relativ gering ist, erfolgt im Rahmen dieser Arbeit keine Korrektur der Kennwerte, sofern der Bruch nicht unterhalb 100 Sekunden eingetreten ist.

4.2.6.3 Einfluss der Prozessparameter während der Produktion

Diverse Prozessparameter haben Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindung. Als Prozessparameter sind Parameter zu verstehen, die im Rahmen der Herstellung keilgezinkter Holzquerschnitte variiert werden können. Dazu zählen in erster Linie Parameter der Klebstoffapplikation (Menge, Pressdruck, Presszeit), die Prozessgeschwindigkeit (Schnittgeschwindigkeit und Materialvorschub), Zustand des Fräswerkzeuges (Justierung der Schneiden und Einstellung des Zinkenspiels) wie auch die Holzfeuchte.

4.2.6.3.1 Klebstoffmenge

Unter den Prozessparametern ist zwischen weichen und harten Parametern zu differenzieren. Besonders negativ wirkt sich eine zu geringe Menge an Klebstoff auf die Festigkeitseigenschaften aus. In Abbildung 85, S. 88 zeichnen sich klar die *Klebstofffraupen* auf der Oberfläche der Keilzinkenflanken ab. Die Zinken wurden aus Prüfkörpern entnommen, die einer Zugprüfung unterzogen worden sind und deren Bruch sich mit Bruchbild 3 (gemäß Abbildung 72, S. 72) beschreiben ließ. Anhand der sich abzeichnenden Klebstoffmenge, lässt sich die Fläche abschätzen, die nicht mit Klebstoff benetzt worden ist und es lässt sich somit der Querschnittsanteil bestimmen, der nicht für den Lastabtrag angesetzt werden kann. Reicht die Menge des Klebstoffs nicht aus, um die zur Verfügung stehende Klebfläche ausreichend zu benetzen, steigen die Scherspannungen in der Klebefuge. Die Leistungsfähigkeit der Keilzinkenverbindung fällt dann geringer aus als sie bei optimaler Klebstoffapplikation wäre.

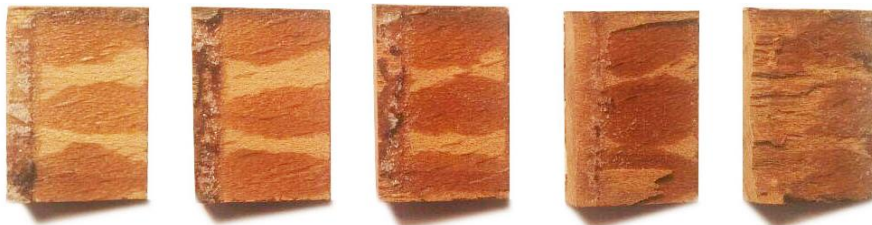


Abbildung 85: Klebstoffbenetzung der Oberflächen. Es sind die Zinkenflanken eines einzelnen Prüfkörpers dargestellt

4.2.6.3.2 Pressdruck

Die Höhe des Pressdrucks, der bei der Verklebung der Fügepartner aufgebracht wird, hat einen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Keilzinkenverbindung. Der optimale Pressdruck hängt von der Zinkenlänge, dem verwendeten Klebstoff, der Dichte und der verwendeten Holzart ab. Mit Zunahme der Zinkenlänge können nach DIN EN 15497 (2014, S. 44) kleinere Pressdrücke (vgl. Abbildung 86) beim Fügen der Querschnitte aufgebracht werden.

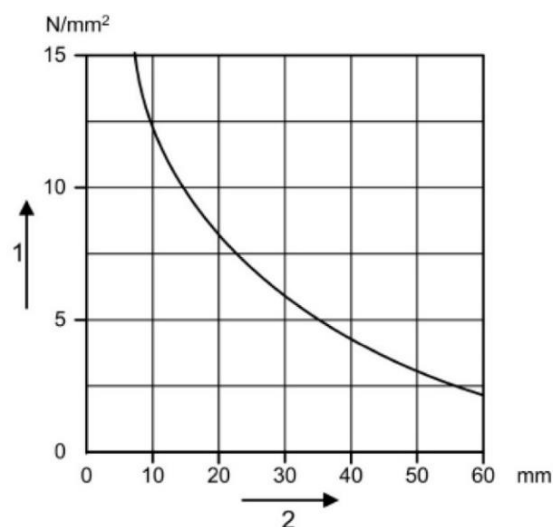


Abbildung 86: Empfohlener Pressdruck (1) bei der Verklebung in Abhängigkeit von der Zinkenlänge (2), die Empfehlungen gelten für die Verklebung von Nadelholz

Castro & Paganini (1997) führten Untersuchungen an Pappelholz durch. Zum Einsatz kamen ein 7,5 mm (I-7,5), ein 15 mm (I-15) und ein 20 mm (I-20) Profil. Verklebt wurden die Querschnitte ($n = 10$; $b = 50$ mm, $h = 23$ mm) mit Aerodux 185 + HRP 150. Für die drei aufgeführten Profile lag der optimale Pressdruck etwa 30 % unterhalb dem in DIN EN 15497 (2014, S. 44) empfohlenen.

Der Einfluss des Pressdrucks auf die Keilzinkenverklebung zwischen Fichte und KP als auch zwischen KP und KP wurde anhand verschiedener Untersuchungen am T-Lab²² quantifiziert. Während sich für die Verklebung von KP mit Fichte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe des Pressdruckes und der Keilzinkenverbindung (vgl. Kap. 3.2.4) abzeichnete, konnte jedoch ein klar erkennbarer Zusammenhang zwischen Pressdruck und Festigkeit bei der Verklebung von KP mit KP (Kap. 3.2.6) nachgewiesen werden (vgl. Abbildung 87 und Abbildung 88, S. 89 f.).

Ähnlich der Erkenntnisse aus Castro & Paganini (1997), lag auch hier der optimale Pressdruck mit ca. 9 N/mm² etwas unterhalb des in DIN EN 15497 (2014, S.44) empfohlenen Wertes.

²² vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.3, S. A-19 und Kap. A-3.2.6, S. A-23

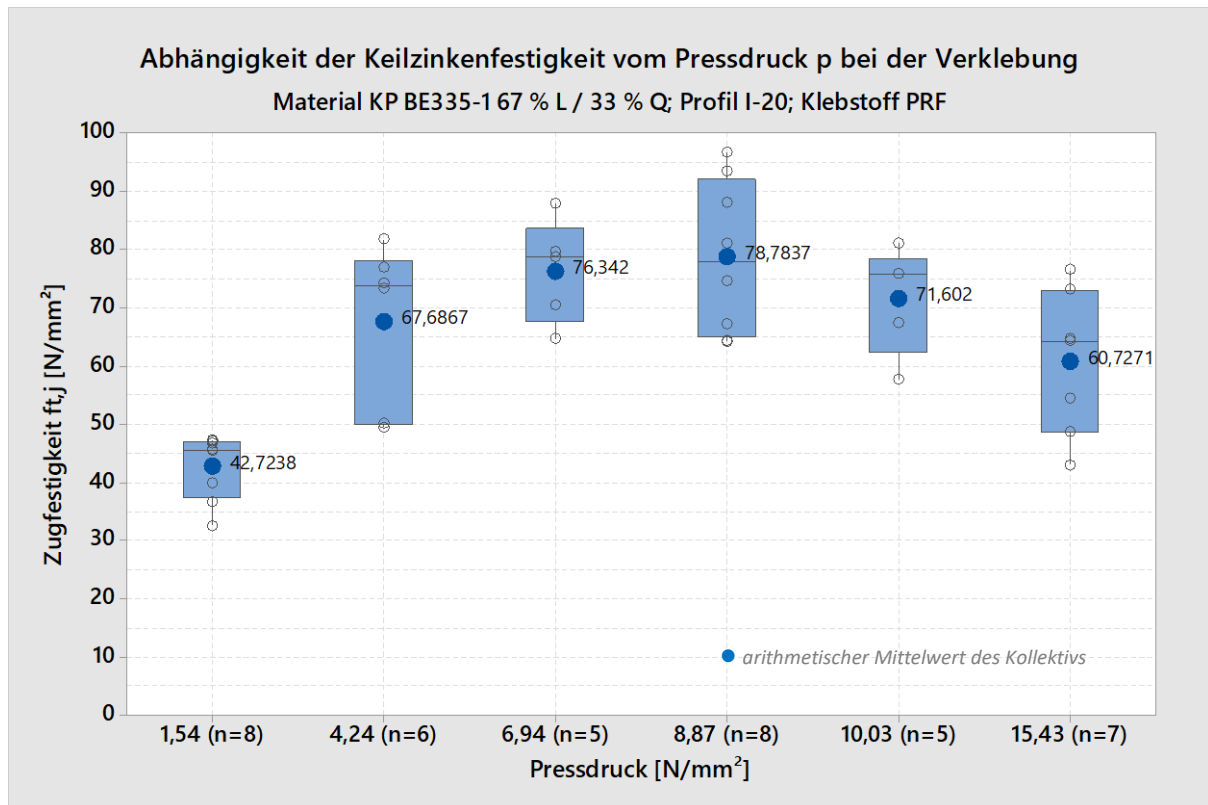


Abbildung 87: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit vom Pressdruck p bei der Verklebung von KP mit KP

Die Tatsache, dass sich ein Pressdruckoptimum bestimmen lässt, dessen Unter- und Überschreitung zu klar erkennbar schlechteren Festigkeitskennwerten führt, erklärt sich wie folgt:

Sowohl bei manuellem als auch bei maschinellm Klebstoffauftrag verteilt sich der Klebstoff unterhalb des Pressoptimums nicht gleichmäßig über die Zinkenflanken. Mit Zunahme des Pressdrucks stellt sich beim Fügen der Querschnitte eine fortschreitend gleichmäßigere Klebstoffschichtstärke ein. Kleine Unebenheiten der Flankenoberflächen, z. B. durch aufgestellte Holzfasern oder durch Holzspäne, werden durch den Pressdruck ausgeglichen.

Bei einer Überschreitung des optimalen Pressdruckes sind die Kräfte auf die Klebstofffuge so groß, dass Anteile des Klebstoffs aus ebendieser herausgedrückt werden. Die Restmenge, des in der Fuge befindlichen Klebstoffs, ist dann nicht mehr ausreichend, um die vollen Bindungskräfte zwischen den Oberflächen auszubilden. Beim Zusammenpressen der Querschnitte steigt zudem mit zunehmendem Pressdruck die Gefahr, dass im Randbereich der Bretter Risse in den Zinkengründen entstehen.

Der optimale Pressdruck hängt neben der Zinkenlänge von der Klebstoffart und der Viskosität des Klebstoffs sowie von der zu verklebenden Holzart ab. Versuche zur Verklebung von Buchenholzquerschnitten (Graf et al., 2018) haben gezeigt, dass bei der Verklebung von Buchenholz mit I-15-Keilzinken und unter Verwendung von PUR-Klebstoff eine Erhöhung des Pressdruckes um ca. 80 % gegenüber der Normempfehlung zu erfolgen hat. Die Steigerung des Pressdruckes war hier zwingend notwendig, da unter der Einhaltung der Normempfehlung keine ausreichend große Anfangsfestigkeit (Klemmwirkung) erreicht werden konnte und die keilgezinkten Querschnitte beim Weitertransport innerhalb der Produktionsstraße auseinanderfielen.

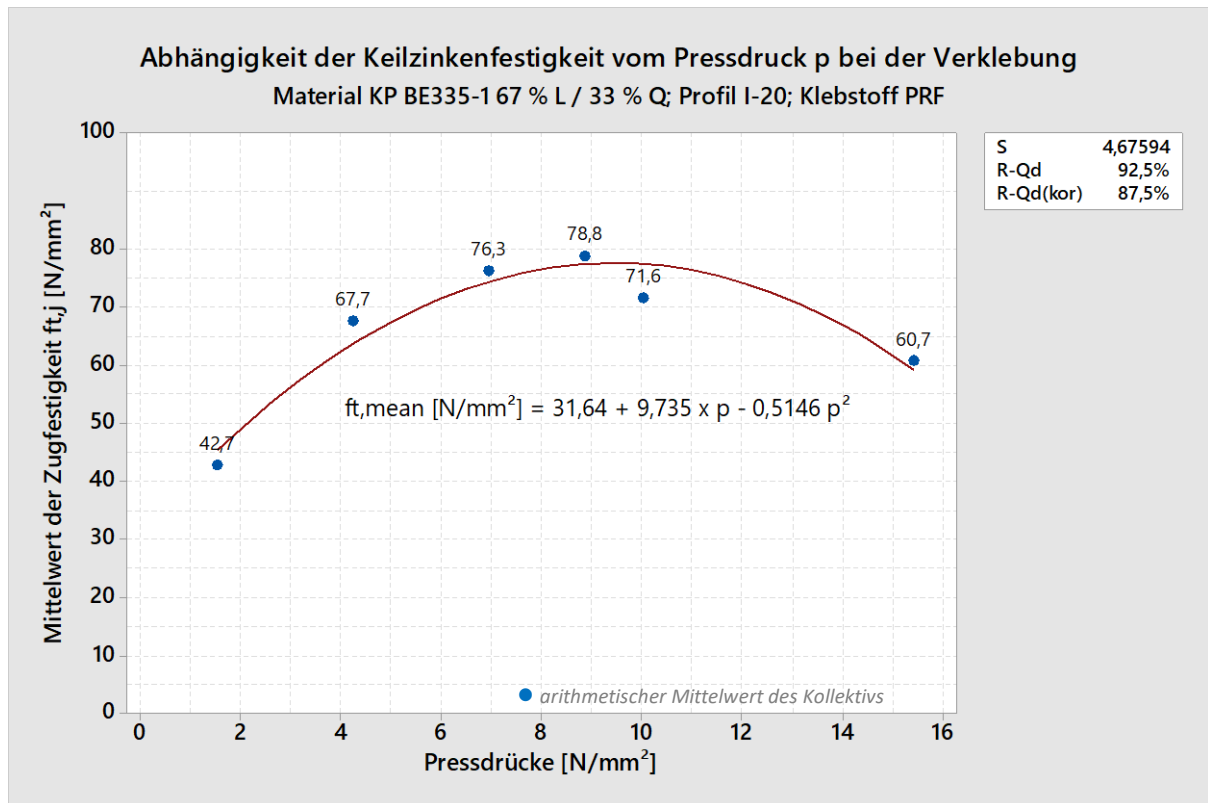


Abbildung 88: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit vom Pressdruck p bei der Verklebung von KP mit KP, Ableitung Regressionsgleichung

4.2.6.3.3 Presszeit

Insofern die ideale Klebstoffmenge industriell exakt aufgebracht werden kann, hat die Presszeit keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen in Pappelholz (Castro & Paganini, 1997), s. Abbildung 89.

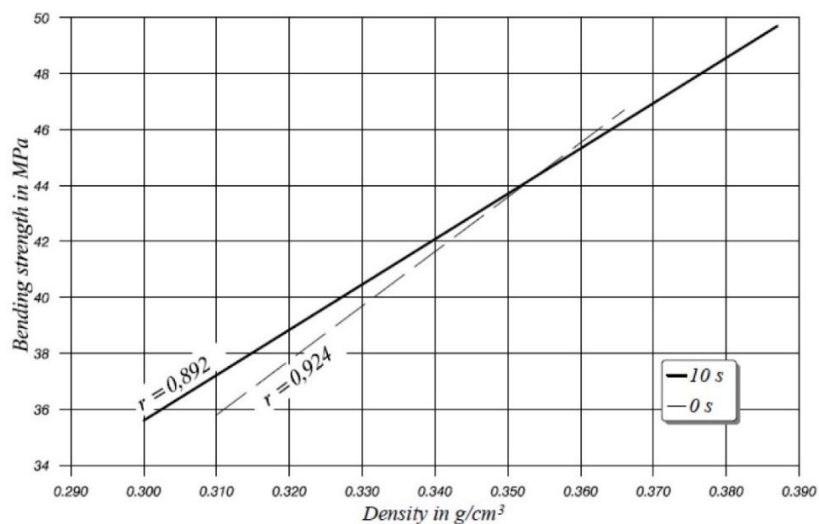


Abbildung 89: Einfluss der Presszeit auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung in Pappelholz

Wird jedoch zu viel Klebstoff aufgetragen, entsteht beim Zusammenpressen ein hydraulischer Druck innerhalb der Fuge, der zum unmittelbaren Lösen der Fügeteilpartner führen kann. Der hydraulische Druck kann dadurch abgebaut werden, dass der Pressdruck über einen längeren Zeitraum aufrecht gehalten wird und dadurch der überschüssige Klebstoff in der Lage ist sich aus der Klebfuge entweder in die Holzzellen zu bewegen bzw. am Rand der Bauteilfuge oder dem Zinkgrund aus der Fuge auszutreten. Bei einem Leimauftrag per Hand, wie beispielsweise in Laborversuchen, sollte daher die Pressdauer auf mindestens 10 Sekunden, besser 20 Sekunden ausgedehnt werden. Auch hier spielt die Rauheit der Zinkenflanke eine entscheidende Rolle auf die Anfangsfestigkeit der Klebfuge. (Obenauer, 2015) Diese ist umso höher, je rauer die Oberfläche der Keilzinkenflanken ist, weil sich bei rauen Flanken die Flanken beider Fügeteilpartner über die Unebenheiten der Oberflächen mit einander verzahnen.

4.2.6.3.4 Prozessgeschwindigkeit bei der Herstellung

Schnittgeschwindigkeiten und Materialvorschub haben Einfluss auf die Festigkeiten der Keilzinkenverbindung. Unter der Schnittgeschwindigkeit ist die Geschwindigkeit zu verstehen, mit der sich die Schneide des Fräswerkzeuges relativ zur Oberfläche des Werkstücks bewegt. Unter dem Materialvorschub ist die Materialstärke zu verstehen, die bei einer vollständigen Umdrehung des Fräswerkzeuges aus der Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks entnommen wird.

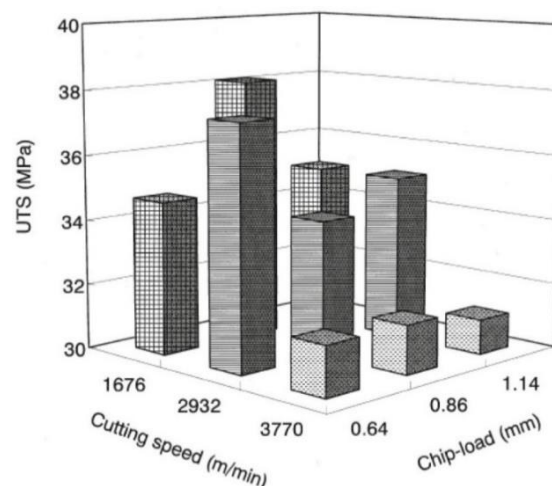


Abbildung 90: Abhängigkeit von Schnittgeschwindigkeit (Cutting speed) und Materialvorschub (Chip-load) auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen

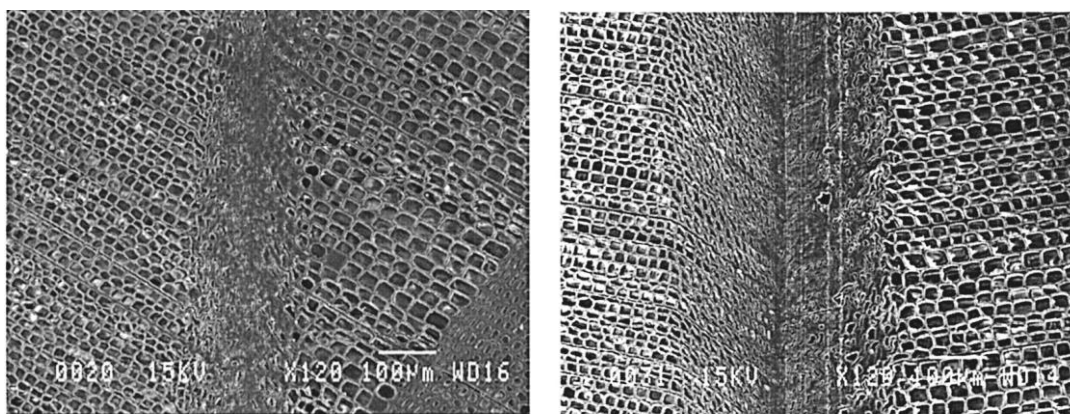


Abbildung 91: Bereich der Holzschädigung: links: Schnittgeschwindigkeit: 1676 m/min; Materialvorschub 0,64 mm/U: Holzschädigung 70 μm ; rechts: Schnittgeschwindigkeit: 3770 m/min; Materialvorschub 0,64 mm/U: Holzschädigung 281 μm

Die Keilzinkenfestigkeit nimmt mit Zunahme der Schnittgeschwindigkeit und Zunahme des Materialvorschubes tendenziell ab. Die Abnahme der Festigkeit lässt sich durch eine Schädigung der Holzoberfläche erklären, die bei geringeren Prozessgeschwindigkeiten weniger stark - hier bis in eine Tiefe von 70 μm - und bei hohen Prozessgeschwindigkeiten - hier bis in eine Tiefe von 281 μm - vorhanden ist. (vgl. Bustos et al., 2004)

Für Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP konnte kein klarer Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der Keilzinkenfestigkeit nachgewiesen werden²³. Das liegt zum einen daran, dass die Drehzahl konstant gehalten und lediglich die Vorschubgeschwindigkeit um 50% gesteigert und um 50% gesenkt worden ist. Hiermit wurde der Materialabtrag der Schneide lediglich um 50% vergrößert oder um 50% verkleinert. In den zuvor zitierten Untersuchungen waren die Veränderungen weitaus größer. Zum anderen war die Anzahl der Prüfkörper (teilweise nur 5 Stück pro Konfiguration) sehr gering. Beide Faktoren gestalten es daher schwierig einen mitunter nur geringfügigen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP nachzuweisen. An dieser Stelle besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf.

4.2.6.3.5 Alterung der Fräswerkzeuge

Der Zustand der holzbearbeitenden Keilzinkenfräser spielt eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Keilzinkenfestigkeit. Die höchsten Festigkeitskennwerte keilgezinkter Querschnitte werden von Werkzeugen erreicht, die bereits einige Stunden im Einsatz waren. Der Anstieg der Keilzinkenfestigkeit wird damit begründet, dass bei neuen Werkzeugen oder frischen Schneiden, die Rauheit der Zinkenflanke zunächst noch zu gering für ein optimales Klebergebnis ist. Um die Rauheit der Flankenoberfläche zu vergrößern, werden unter anderem überhöhte Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/min ²⁴ gewählt. Eine unmittelbare Steigerung der Leistungsfähigkeit frischer Werkzeuge kann auch damit erreicht werden, dass zunächst eine geringe Menge an feinem Sand auf die Werkzeuge gestreut und damit eine künstliche Alterung herbeigeführt wird. (Obenauer, 2015)

Der Leistungsabfall der Keilzinkenfestigkeit oberhalb der maximalen Leistungsfähigkeit der Werkzeuge erklärt sich durch stumpfe Schneiden, die zu einer starken Beschädigung der Flankenoberfläche führen. Auf industriellen Anlagen kann durch Anpassung der Vorschubgeschwindigkeiten, der Drehzahl und des Materialvorschubs darauf reagiert werden. (Obenauer, 2015)

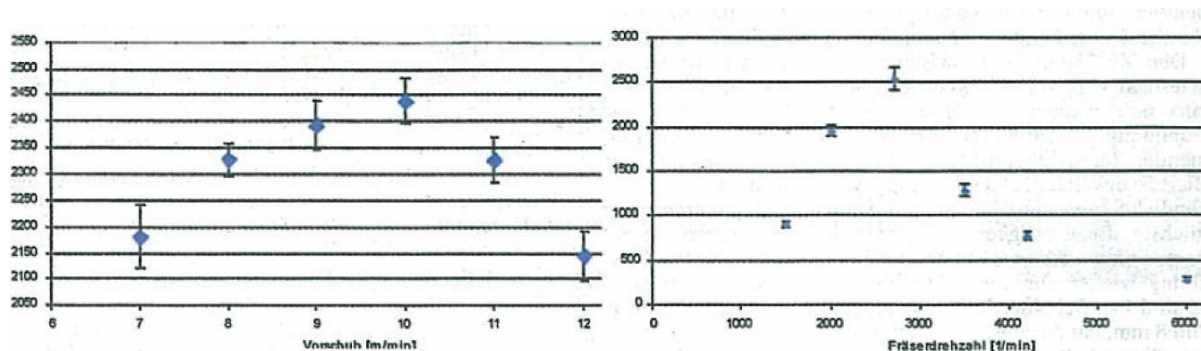


Abbildung 92: Links: Standzeit in Stunden der Keilzinkenfräser in Abhängigkeit vom Vorschub. Rechts: Standzeit in Stunden der Keilzinkenfräser in Bezug auf die Werkzeugdrehzahl

²³ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.3, S. A-19

²⁴ hier: Geschwindigkeit, mit der die zu bearbeitenden Werkstücke an der Frässpindel vorbeigeführt werden.

In Abhängigkeit des Fräsertyps und des zu bearbeitenden Holzes, können die ideale Vorschubgeschwindigkeit und die ideale Drehzahl des Fräasers abgeleitet werden (vgl. Abbildung 92 S. 92). Wird einer der beiden Parameter verändert, so sinkt die Standzeit der Werkzeuge. Dabei hat die Drehzahl des Fräswerkzeugs einen stärkeren Einfluss auf die Standzeit als die Vorschubgeschwindigkeit (Aigner et al., 2009). Der Grund für die Abnahme der Standzeit der Fräser liegt darin, dass mit Erhöhung der Drehzahl die Spandicke geringer ausfällt und damit die Reibung auf die Fräuserschneide respektive die Beanspruchung zunimmt, was zu einer vorzeitigen Schneidenkantenabrundung führt (Aigner et al., 2009).

Reeb et al. (1999) beschreiben eine Vergrößerung der Zellschädigung der Zinkenflanke mit fortschreitendem Alter des Fräswerkzeuges. Dazu wurden Stichproben an keilgezinkten Holzquerschnitten nach einer Laufzeit von 4 Stunden, 6 Stunden und 32 Stunden genommen und die Zellschädigung der Flankenoberfläche mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht. Die Vorschubgeschwindigkeiten lagen bei 60 Fuß pro Minute, was in etwa 18 m/min entspricht. Nach 4 Stunden zeigten sich Zellschädigungen bis zu einer Tiefe von 100 µm, nach 6 Stunden von 135 µm und nach 32 Stunden von 200 µm.

Die im Rahmen dieser Arbeit hergestellten und geprüften Keilzinkenverbindungen wurden jeweils mit neuen Fräsern hergestellt. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Laufleistungen konnte keine Alterung der Werkzeuge durch eine Abnahme der Keilzinkenfestigkeit beobachtet werden. Die Werkzeugbelastung bei der Bearbeitung von KP ist in etwa vergleichbar mit der Werkzeugbelastung bei der Bearbeitung von Aluminium. Aus diesem Grund wird die Standzeit der Keilzinkenfräser bei der Bearbeitung von KP entsprechend geringer ausfallen als es bei der Bearbeitung von Hart- oder Weichhölzern der Fall ist. Zellschädigungen im Bereich der Schnittkanten werden daher bereits bei einer geringeren Laufleistung der Werkzeuge eintreten. Weiterführende Untersuchungen zur Werkzeugalterung fanden im Rahmen dieser Arbeit nicht statt.

4.2.6.3.6 Holzfeuchte und Holztemperatur während der Verklebung

Holzfeuchte und Holztemperatur haben Einfluss auf die Aushärtung des Klebstoffs. Die Hölzer müssen in Abhängigkeit des Klebstoffs, innerhalb des vom Klebstoffhersteller angegebenen Holzfeuchtebereich, verklebt werden. In der Regel liegt dieser zwischen 7 und 18 % (DIN EN 15497, 2014, S. 42.) Die Temperatur der Holzquerschnitte muss bei der Verklebung mindestens 15 °C betragen (EN 385, 2007, S. 9). Im Gegensatz zu Polyurethanklebstoffen benötigen Melaminharzklebstoffe, Phenolharzklebstoffe, Emulsion-Polymer-Isocyanat-Klebstoffe oder Epoxidharzklebstoffe zur Aushärtung kein Wasser und können deshalb auch bei geringen Holzfeuchten für eine Klebung eingesetzt werden.

4.2.6.3.7 Alterung der Schnittfläche

Unter der Holzalterung ist eine Veränderung der Polarität der frisch angeschnittenen Zellwand zu verstehen. Mit steigendem Alter sinkt die Polarität (vgl. Abbildung 93 S. 94) der Schnittfläche und die Verklebungseigenschaften verschlechtern sich (Müller et al., 2014). Aus diesem Grund sind nach DIN EN 15497 (2014, S. 43) Keilzinkenverbindungen spätestens nach 6 Stunden zu verkleben. Da Keilzinkenverbindungen in Brettschichtholzwerken in der Regel unmittelbar nach dem Fräsen verklebt werden, kann eine Alterung der Schnittfläche und damit eine Verschlechterung der Klebeigenschaften praktisch ausgeschlossen werden.

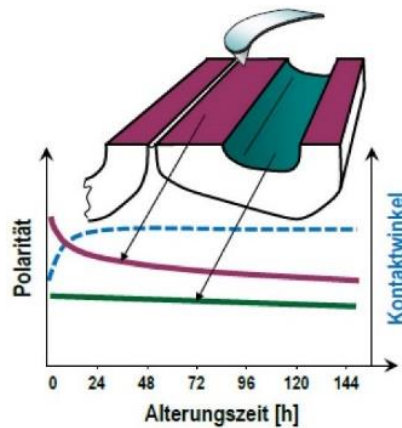


Abbildung 93: Alterung einer frisch angeschnittenen Holzzelle

4.2.6.3.8 Abweichungen des Faserverlaufes und Schichtfehler

Abweichungen des Faserverlaufes innerhalb der Keilzinken führen zu einem deutlichen Festigkeitsabfall in Keilzinkenverbindungen im Vergleich zu Keilzinkenverbindungen mit idealer Faserausrichtung.

Die im Rahmen dieser Arbeit getätigten Untersuchungen wurden an nativen Hölzern durchgeführt, die in die Sortierklasse S10 eingestuft worden sind. Für diese Sortierklasse sind Faserneigungen von bis zu 12% zulässig (DIN 4074-1, 2012, S. 20). Abweichungen des Faserverlaufes - insbesondere für Buchenholz – können nur schwer visuell oder maschinell erkannt werden (Volkmer et al., 2017).

Ein klarer Effekt der Faserneigung auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Holz der Sortierklasse S10 und KP konnte bislang nicht nachgewiesen werden.

Wie im Kap. 3.6.1 dargestellt, wird die Festigkeit von KP-Querschnitten bei einer Zugbeanspruchung stark durch Schichtfehler im Aufbau des Plattenwerkstoffes bestimmt. Schichtfehler - hier in Form von Überlappungen - führen, insofern sie im Bereich der Keilzinkenverbindung vorhanden sind (vgl. Abbildung 94), zu einer erheblichen Minderung der Keilzinkenfestigkeit. Um hohe charakteristische Festigkeitskennwerte keilgezinkter Querschnitte zu erzielen, muss gewährleistet werden, dass keine Überlappungsschichtfehler im unmittelbarem Bereich der Keilzinkenverbindung vorhanden sind.

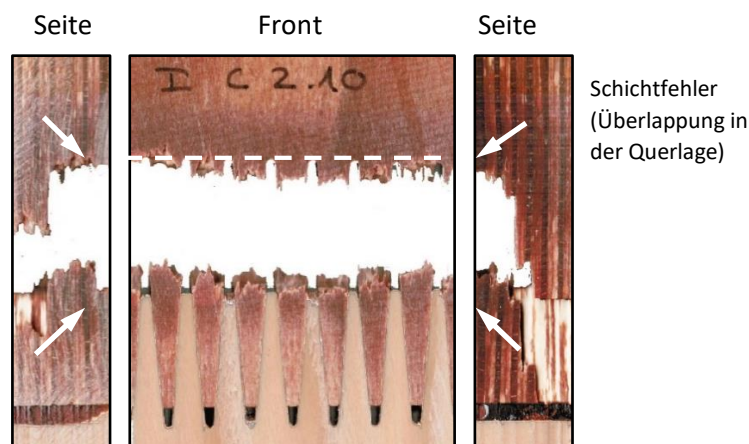


Abbildung 94: Schichtfehler nahe des Keilzinkengrundes

4.2.6.4 Einfluss der Klebstoffart

Unter gleichen Randbedingungen zeigen unterschiedliche Klebstoffe unterschiedliche Festigkeitseigenschaften. Franke et al. (2013) untersuchten PUR-Klebstoff, MUF-Klebstoff und EPI-Klebstoff für die Verklebung von Buchenholz. An den mit MUF-Klebstoff verklebten Querschnitten konnten die höchsten Festigkeitskennwerte ermittelt werden, während an den mit PUR-Klebstoff und mit EPI-Klebstoff verklebten Querschnitten 16 % - 17 % geringere Festigkeiten dokumentiert wurden.

Zur Einstufung der Festigkeitseigenschaften von PRF-Klebstoffen wurden weiterführende Untersuchungen hinsichtlich des Festigkeitsverhaltens von Aerodux 185 in Keilzinkenverbindungen zwischen Buchenholzquerschnitten durchgeführt ²⁵.

Auch die Untersuchungen am Fachgebiet Tragwerk und Material belegen einen deutlichen Einfluss der Klebstoffart auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung. Neben des PRF-Klebstoffs wurden auch ein MUF-Klebstoff (Kauramin 683 mit Härter Kauramin 688) und ein PUR-Klebstoff (Loctite HB S 209 Purbond) zum Verkleben der Buchenholzquerschnitte eingesetzt. Zum Einsatz kam ein I-15 Profil. Auch hier zeigte sich, dass mit MUF-Klebstoff die höchste Biegefestigkeit erreicht werden kann. Die Biegefestigkeit entsprach dabei ca. der Festigkeit, die Franke et al. (2013) für MUF-Klebstoff in Keilzinkenverklebungen des Typs I-15 an Buche ermittelt haben. Die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit Aerodux-Klebstoff fiel 11 %, die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen mit PUR-Klebstoff 32 % geringer aus (vgl. Abbildung 95).

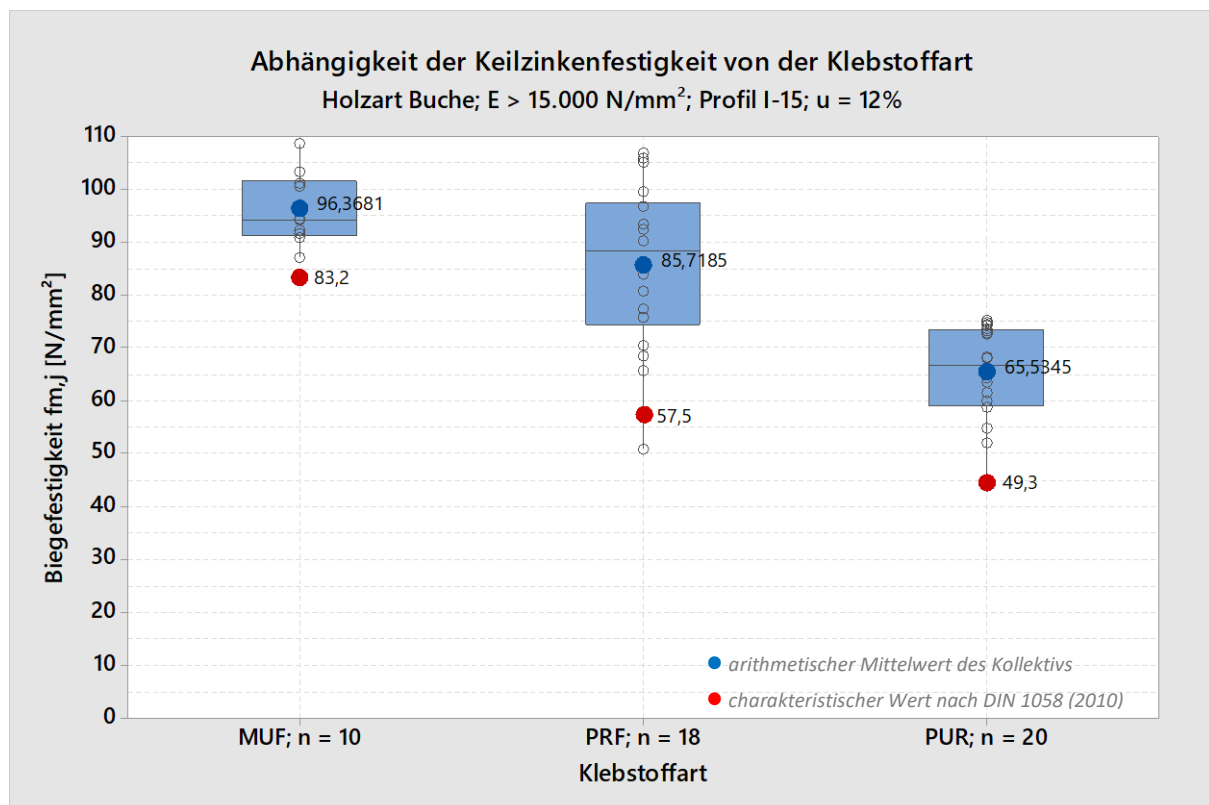


Abbildung 95: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Klebstoffart

Da die Furniere von KP BE 335-1 mit einem PRF-Harz imprägniert werden, wurde entschieden auch die Keilzinkenverbindungen zwischen KP und nativem Holz mit einem PRF-Klebstoff zu realisieren, um

²⁵ vgl. Prüfbeschreibung im Anhang: Kap 3.3.3, S. A-240

mögliche Materialkonflikte unterschiedlicher Klebstoffgruppen untereinander ausschließen zu können. Klebverbindungen werden im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG unter anderem mit Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 ausgeführt, einem Klebstoff, der also in die gleiche Klebstoffgruppe wie Aerodux 185 einzuordnen ist. Alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Keilzinkenfestigkeit zwischen nativem Holz und KP wurden an Prüfkörpern realisiert, die mit Bakelite-Klebstoff verklebt wurden.

4.2.6.5 Einfluss durch die Zinkung von Fügepartnern unterschiedlicher Holzarten

Nach DIN EN 15497 (2014, S. 11) sind ausschließlich Keilzinkenverbindungen zwischen Hölzern der gleichen Holzart zulässig. Eine Ausnahme stellen Universal-Keilzinkenverbindungen nach DIN EN 387 (2002) dar. Für Universal-Keilzinkenverbindungen sind neben Klebungen zwischen Hölzern der gleichen Holzart auch Klebungen mit Fügepartnern „... aus Furnierschichtholz oder Baufurnier-Sperrholz...“ (DIN EN 387, 2002, S. 4) zulässig.

Um einen möglichen Einfluss durch die Zinkung von Fügepartnern unterschiedlicher Materialart zu ermitteln, wurden Festigkeitsuntersuchungen an Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Fichtenholz und KP durchgeführt ²⁶. Verglichen wurden die Ergebnisse mit Untersuchungen zur Keilzinkenfestigkeit in Fichtenholz und mit Untersuchungen zur Keilzinkenfestigkeit in KP.

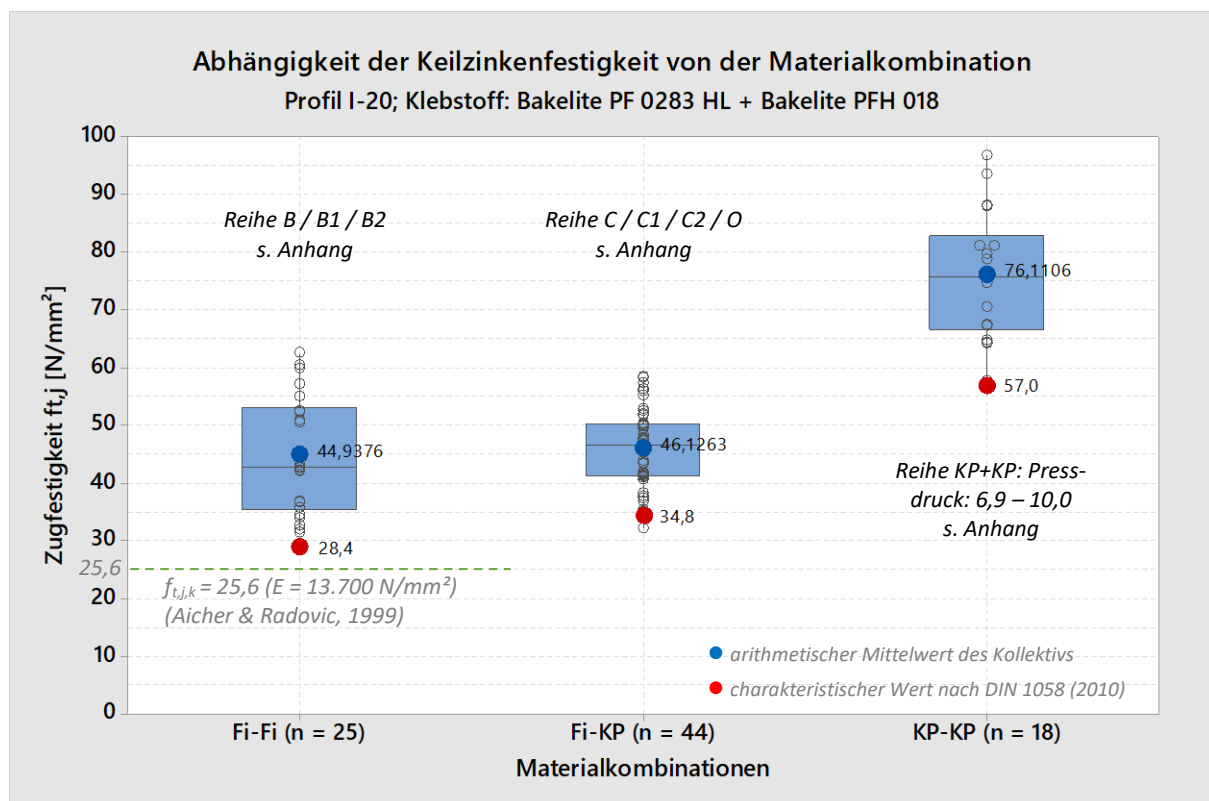


Abbildung 96: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Materialkombination

²⁶ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.3, S. A-19; Kap. A-3.2.4, S. A-21; Kap. A-3.2.6 S. A-23; Kap. A-3.3.6 S. A-31

Die Keilzinken wurden mit dem Vorzugsprofil I-20 gefräst und mit Bakelite PF 0283 HL, PFH 0183 H unter dem in DIN EN 15497 (2014, S. 44) empfohlenen Pressdruck verklebt.

Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Fichtenholz und KP zeigten im Zugversuch im Mittel etwas bessere Festigkeitskennwerte als Keilzinkenverbindungen zwischen zwei Querschnitten aus nativer Fichte (vgl. Abbildung 96, S. 96). Dies ist auf die etwas geringere Streuung der Kennwert zurückzuführen, was sich positiv, insbesondere auf den charakteristischen Festigkeitskennwert von Keilzinkenverbindungen zwischen nativer Fichte und KP, auswirkt. Die geringere Streuung kann damit erklärt werden, dass bei einer Keilzinkenklebung zwischen Fichte und KP der hochtragfähige Spätholzanteil des Fichtenholzes immer vollständig mit einem Material verklebt wird, das höhere Festigkeitseigenschaften als der Spätholzanteil selbst aufweist. In Keilzinkenverbindungen zwischen zwei Querschnitten aus Fichtenholz treffen die Spätholzanteile zum Teil auf Spätholzanteile, aber zum Teil auch auf Frühholzanteile. Dadurch kann immer nur ein geringer Teil des hochtragfähigen Spätholzanteils - nämlich nur der, der mit einem weiteren Spätholzanteil verklebt wurde - zum Kraftabtrag angesetzt werden. Sind die Jahrringe eng und der Spätholzanteil groß, ist der Anteil an Klebfläche zwischen den Spätholzanteilen ebenfalls groß und damit die Klebfestigkeit hoch. Sind die Jahrringe weit dann treffen sich die Spätholzanteile nur punktuell, die Festigkeit fällt dann gering aus (s. dazu auch Kap. 4.2.6.6, S. 102). Aufgrund der möglichen Klebbilder (vgl. Abbildung 101, S. 102 und Abbildung 107, S. 107) fällt die Streuung dann verhältnismäßig groß aus.

An keilgezinkten Querschnitten aus KP lag die Keilzinkenzugfestigkeit 65 % über der Keilzinkenzugfestigkeit, die an Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Fichtenholz und KP ermittelt wurden (vgl. Abbildung 96).

4.2.6.6 Einfluss des Elastizitätsmoduls, der Dichte und der Jahrringbreite

4.2.6.6.1 Elastizitätsmodul

Aicher & Radovic (1999) führten Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen des Typs I-20 und I-20m in Fichtenholz unter Verwendung eines Melaminklebstoffs durch. Es zeigte sich, dass die Keilzinkenzugfestigkeit mit dem Zug-Elastizitätsmodul (vgl. Abbildung 97, S. 98) korrelieren.

Blaß & Frese (2006) führten Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 in Buchenholz unter Verwendung eines Melaminklebstoffs durch. Es zeigte sich, dass die Keilzinkenbiegefestigkeit und der Biege-Elastizitätsmodul korrelieren (vgl. Abbildung 98, S. 98).

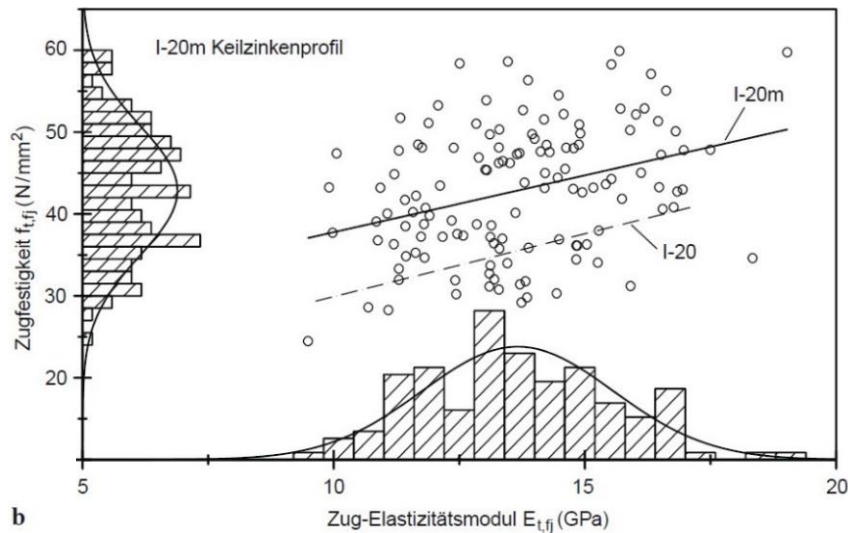


Abbildung 97: Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Zug-Elastizitätsmodul der Keilzinkenstöße bei Versuchskollektiven a) I-20 und b) I-20m Profil

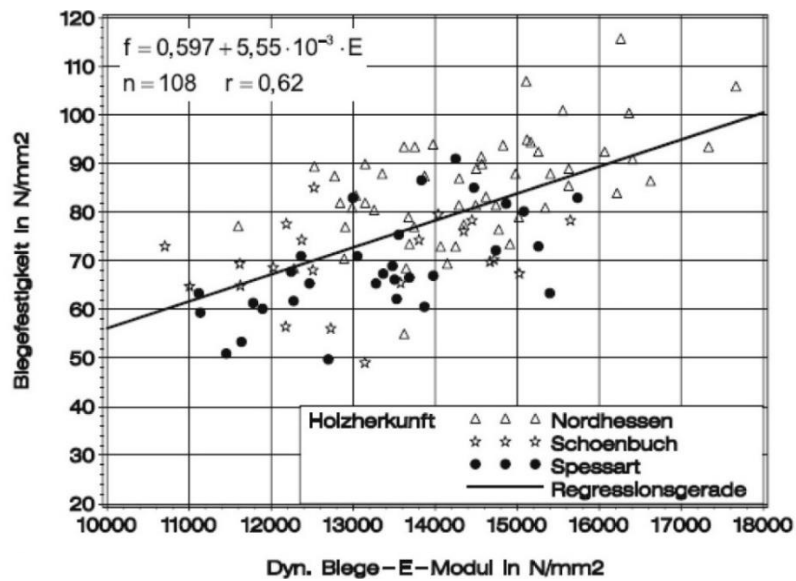


Abbildung 98: Keilzinkenbiegefestigkeit in Abhängigkeit vom dynamischen Biege-Elastizitätsmodul; Untersuchung nach Herkunft

Die Keilzinkenzugfestigkeit kann für ein Zinkenprofil I-20 in Fichtenholz mittels des Zug-Elastizitätsmoduls über die nachfolgende Regressionsgleichung bestimmt werden:

Profil I-20:

$$I) \quad \ln(\beta_z^{KZV}) = 2,716 + 5,905 \times 10^{-5} \times E_z^{KZV} \quad (Ehlbeck \text{ et al., } 1985)$$

Aicher & Radovic (1999) geben für die Ermittlung der Keilzinkenfestigkeit nachfolgende Regressionsgleichungen für das I-20-Profil und das I-20m-Profil an: ²⁸

²⁷ Einheit des Elastizitätsmoduls in [N/mm²]

²⁸ Einheit des Elastizitätsmoduls in [GPa]

Profil I-20:

$$\text{II)} \quad f_{t,fj} = 14,57 + 1,534 \times E_{t,fj} \quad , r = 0,446$$

bzw.

$$\text{III)} \quad f_{t,fj} = \exp(2,92 + 4,669 \times 10^{-2} \times E_{t,fj}) \quad , r = 0,449$$

Profil I-20m:

$$\text{IV)} \quad f_{t,fj} = 23,88 + 1,389 \times E_{t,fj} \quad , r = 0,335$$

bzw.

$$\text{V)} \quad f_{t,fj} = \exp(3,288 + 3,308 \times 10^{-2} \times E_{t,fj}) \quad , r = 0,332$$

Für die Holzart Fichte nennt (DIN 68364, 2003, S. 2) einen mittleren Biege-Elastizitätsmodul von 11.000 N/mm². Der Zug-Elastizitätsmodul $E_{t,fj}$ berechnet sich zu:

$$E_{t,fj} = \sim 1,03 \times E_{0,mean} = 11.330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (\text{Aicher \& Radovic, 1999})$$

Nachfolgende Tabelle stellt den Mittelwert der Keilzinkenzugfestigkeiten basierend auf den unterschiedlichen Regressionsgleichungen dar:

Tabelle 11: Rechnerische Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung mit $E_{0,mean} = 11.000 \text{ N/mm}^2$ ($E_{t,fj} = 11.330 \text{ N/mm}^2$)

I-20-Profil	Gleichung	I-20m-Profil	Gleichung
29,5 N/mm ²	(I)	39,6 N/mm ²	(IV)
32,0 N/mm ²	(II)	39,0 N/mm ²	(V)
31,5 N/mm ²	(III)		

Charakteristische Kennwerte

Aicher und Radovic geben für die Profile I-20 und I-20m nachfolgende charakteristische Keilzinkenzugfestigkeiten bei einem Zug-Elastizitätsmodul von 13.700 N/mm² an:

$$f_{t,k,I-20} = 25,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad f_{t,k,I-20m} = 29,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Damit liegen die charakteristischen Keilzinkenzugfestigkeiten für beide Profile deutlich über der charakteristischen Zugfestigkeit für die Festigkeitsklassen C24 = 14 N/mm²; C30 = 18 N/mm² und C35 = 21 N/mm².

Biege-Elastizitätsmodul und Keilzinkenbiegefestigkeit ²⁹

Es wurden Untersuchungen zur Keilzinkenbiegefestigkeit in Fichtenholz durchgeführt. Der Elastizitätsmodul der Fügepartner war in allen Versuchen gleich. Die Keilzinken wurden mit einem Profil I-15 gefräst und mit Aerodux 185 mit Härter HRP 155 verklebt.

²⁹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.3.7, S. A-33 f.; Kollektiv 1

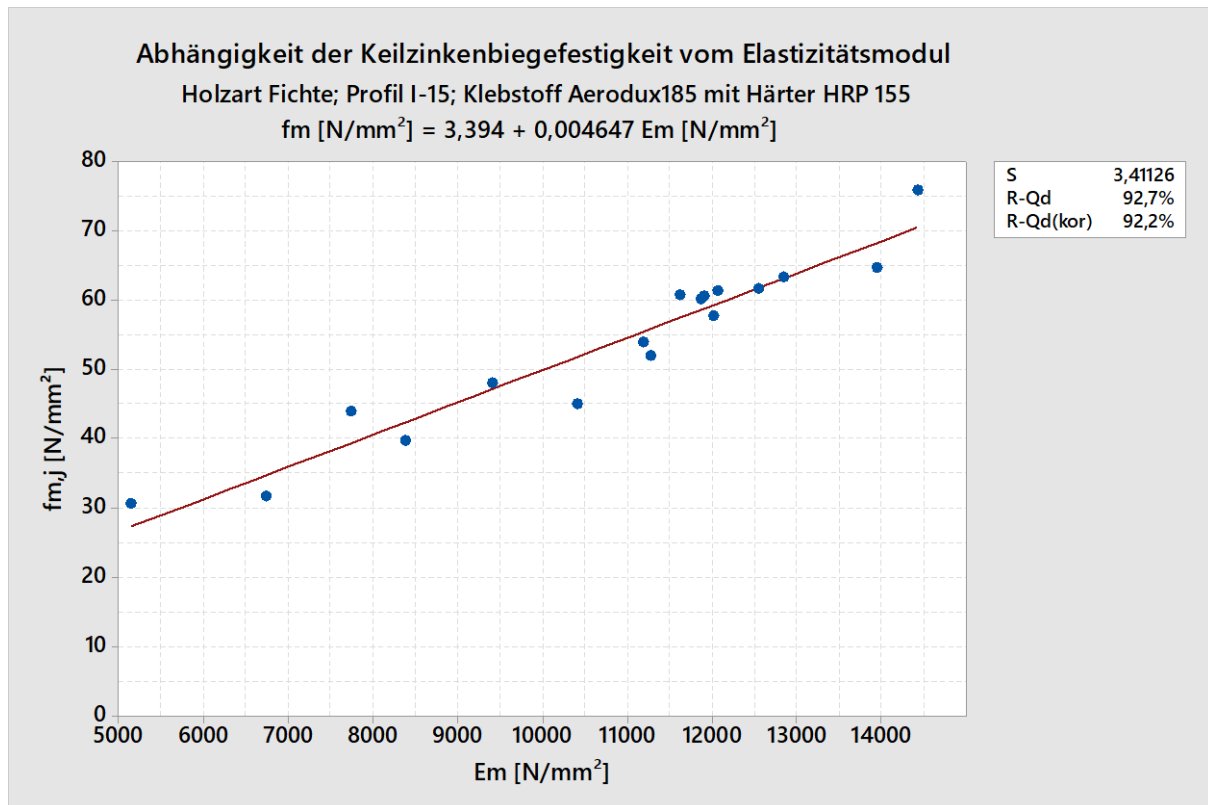


Abbildung 99: Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit vom Elastizitätsmodul

Die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung I-15 korreliert in hohem Maß mit dem Biege-Elastizitätsmodul der Fügepartner (vgl. Abbildung 99). Die Regressionsgleichung lautet:

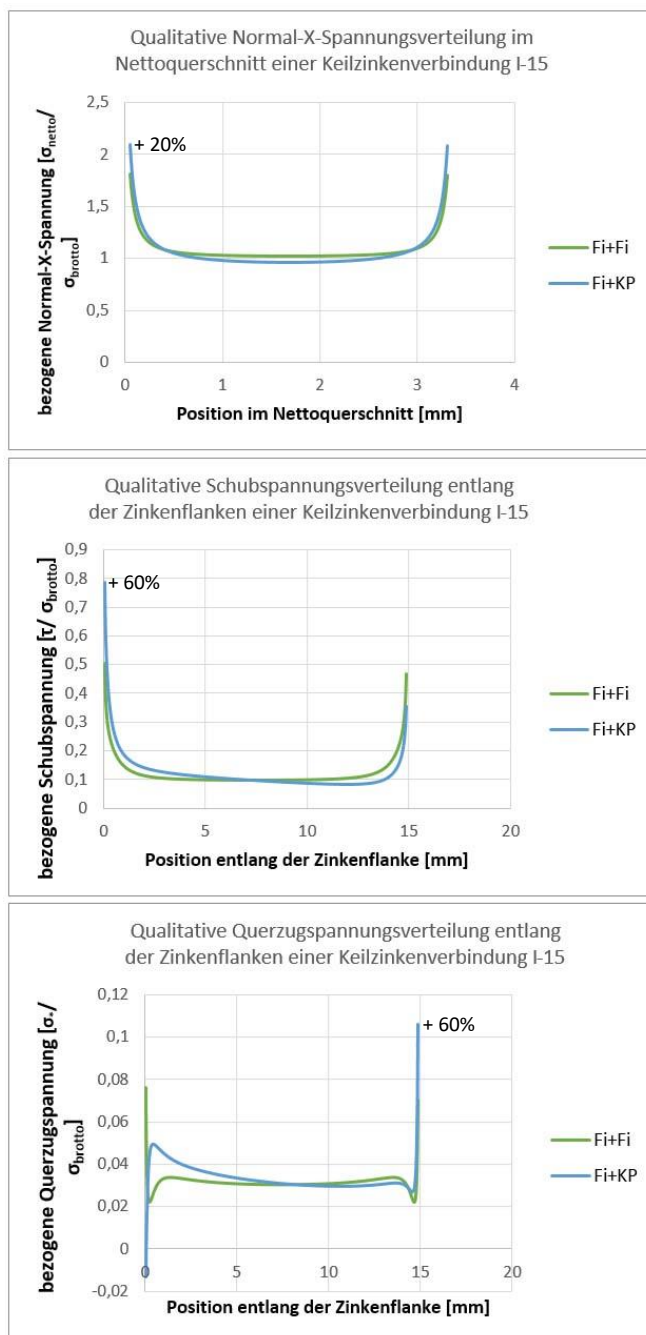
Profil I-15: $f_{m,j} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 3,394 + 0,004647 \times E_m \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] \quad [\text{R-Qd} = 92,7 \, \%]$

Mit zunehmendem Elastizitätsmodul steigt zum einen die Festigkeit des Holzes (vgl. Kap. 3.1, S. 26 ff.), zum anderen sind die Spannungsspitzen aufgrund geringerer elastischer Verformungen in der Klebfuge geringer (vgl. Kap. 4.2.3); aus diesem Grund steigt die Keilzinkenfestigkeit an.

4.2.6.6.2 Elastizitätsmodulldifferenz der Klebpartner

Klebverbindungen können besonders leistungsfähig sein, wenn sie zwei Querschnitte aus Materialien gleicher oder ähnlicher Eigenschaften mit einander verbinden. Werden zwei Querschnitte aus ein und demselben Material mit einander verklebt, so verteilen sich die Spannungen innerhalb der Klebfuge möglichst gleichmäßig. Weisen die Querschnitte jedoch unterschiedliche Elastizitätsmoduln oder ein unterschiedliches thermisches oder hygroskopisches Ausdehnungsverhalten auf, so entstehen innerhalb der Klebfuge Spannungsumverteilungen, die zu Spannungskonzentrationen führen, welche die Klebfuge zusätzlich belasten und ein vorzeitiges Versagen verursachen können. Aus diesem Grund ist es nachvollziehbar, dass nach DIN EN 15497 (2014, S. 6) zunächst ausschließlich Klebverbindungen zwischen Hölzern der gleichen Holzart zulässig sind.

In der Regel weisen zwei mit einer Keilzinkung verbundene Querschnitte jedoch unterschiedliche Elastizitätsmoduln auf. In einer Keilzinkenverbindung aus zwei Materialien mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln treten unter einer mechanischen Beanspruchung nach Aicher & Klöck (1990) Spannungsumlagerungen mit Spannungserhöhungen im Querschnitt mit der geringeren Steifigkeit auf. Eine Begründung, warum sich die Spannungen im Fügepartner mit dem geringeren Elastizitätsmodul erhöhen und nicht im Fügepartner mit dem höheren Elastizitätsmodul bleiben sie jedoch schuldig. Für eine Keilzinkung eines Querschnitts mit dem Elastizitätsmodul 1 = 10.000 N/mm² mit einem Querschnitt mit dem Elastizitätsmodul 2 = 13.000 N/mm² beziffern Aicher & Klöck (1990) „... die Zugspannungsspitzen im Nettoquerschnitt des weniger steifen Fügepartners gut 10 % höher als diejenigen im steiferen Fügepartner. Die maximalen Holzschubspannungen in den Zinkenflanken im Bereich des Zinkengrundes sind (...) im schwächeren Fügepartner um ~ 30 % höher als im steiferen (...) Teil“.



Einfluss durch Verklebung unterschiedlicher Hölzer auf die Spannungsverteilung entlang der Keilzinkenverbindung

In Abbildung 71, S. 71 sind die Spannungsverteilungen im Nettoquerschnitt und entlang der Klebfuge für die Kombination Fichte/Fichte und die Kombination Fichte/KP gegenübergestellt. Die Spannungsverteilung wurde anhand des unter Abbildung 71 aufgeführten FEM-Modells (mit Material 1 = Fichte und Material 2 = Fichte oder KP) ermittelt. Die Werkstoffparameter sind Tabelle 30, S. A-2 zu entnehmen.

Die Verklebung von Fichte mit KP führt sowohl zu einem Spannungsanstieg im Nettoquerschnitt des nativen Fichtenholzes (vgl. Abbildung 100, oben), zu einem Schubspannungsanstieg (vgl. Abbildung 100, Mitte) als auch zu einem Anstieg der Querspannungen auf die Klebfuge (vgl. Abbildung 100, unten).

Anmerkung: Für Keilzinkenverbindungen gelten die unter Kap. 4.2 hergeleiteten Gleichungen zur Ermittlung des Spannungszustandes nur mit ausreichend großem Abstand vom Zinkengrund und nur bei einer Verklebung gleicher Materialien.

Abbildung 100: Spannungsverteilung im Nettoquerschnitt (Fichte) und der Klebfuge (Fichte) in Abhängigkeit der Werkstoffkombination

Ein möglicher Erklärungsansatz dafür, warum sich die Spannung im Fügepartner mit geringerem Elastizitätsmodul und nicht im Fügepartner mit höherem Elastizitätsmodul erhöht besteht darin, dass der steifere Fügepartner zwar Spannungen *anzieht*, diese jedoch aus dem Inneren der Zinke des weniger steifen Fügepartners zur Klebfuge hin umgeleitet werden müssen. Da das Integral der Spannungen im Zinkengrund für die unterschiedlichen Materialkombinationen jedoch gleichbleiben muss, steigt infolge dessen die Spannungen zum Zinkenrand hin an (vgl. Abbildung 100, oben).

Um den Einfluss von Steifigkeitsdifferenzen der Fügepartner auf die Biegefestigkeit einer Keilzinkenverbindungen zu quantifizieren, wurden Versuche an Fichtenquerschnitten mit gleichem und mit unterschiedlichen Elastizitätsmoduln durchgeführt ³⁰.

Unterschiedliche Elastizitätsmoduln der Fügepartner wirkten sich im Biegeversuch nicht nachteilig auf die Keilzinkenfestigkeit aus. Bezogen auf den weniger steifen Fügepartner stiegen die Keilzinkenfestigkeiten mit Zunahme der Steifigkeit des steiferen Fügepartners sogar an (vgl. Abbildung 102, S. 103 und Abbildung 103, S. 104).

In ihrer theoretischen Herleitung gehen Aicher & Klöck (1990) davon aus, dass die Eigenschaften der zu verklebenden Querschnitte über die Klebflächen gleich verteilt sind. Tatsächlich sind die Eigenschaften in ein und demselben Jahrring bereits unterschiedlich (Frühholz und Spätholz).

Holz kann als poröser Werkstoff verstanden werden, der sich vereinfacht durch ein System aus einzelnen in Wachstumsrichtung des Baumes orientierten Röhren beschreiben lässt. Das Röhrensystem kann in der Querschnittsfläche als Gitterstruktur gemäß Abbildung 101 a) verstanden werden.

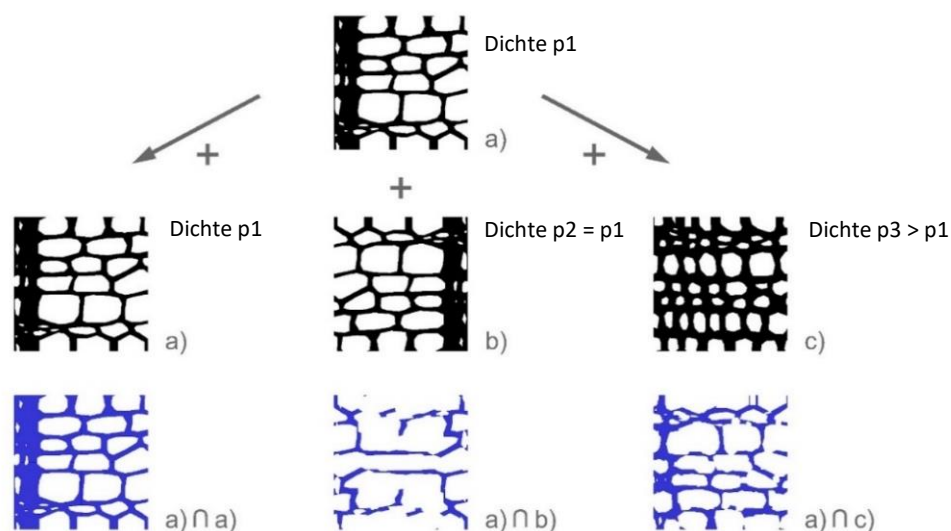


Abbildung 101: Schema Klebfläche bei Holzklebungen

³⁰ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.3.7, S. A-33

Große Klebfestigkeiten werden durch große Klebflächen erreicht. Die größtmögliche Klebfläche entsteht bei einer Holzklebung dann, wenn sich zwei exakt gleiche Flächengitter übereinander befinden (vgl. Abbildung 101; a) \cap a)), da hier die gesamte Gitteroberfläche auf einer benachbarten Oberfläche aufliegt. Hier ist die Schnittmenge der beiden Oberflächengitter und damit die Klebfläche maximal. Dieser Fall tritt in der Realität jedoch nie ein, weil beim Verkleben von Querschnitten zwangsläufig immer Versätze der Gitterstrukturen vorliegen.

Die geringste Klebfestigkeit ist bei Klebungen zweier Holzquerschnitte von geringer Dichte vorzufinden, da hier die Schnittmenge der Oberflächengitter minimal ist (vgl. Abbildung 101; a) \cap b)). Im Hinblick auf die Querschnittsfläche a) kann die Klebfläche gesteigert werden, wenn a) mit einem Fügepartner verklebt wird, der eine höhere Dichte aufweist als er selbst, da sich bei dieser Klebung eine Steigerung der Klebfläche (vgl. Abbildung 101; a) \cap c)) erzielen lässt.

Den theoretischen Spannungsspitzen aufgrund von Elastizitätsmodul differenzen stehen eine größere Klebfläche gegenüber, was zur Relativierung des von Aicher & Klöck (1990) beschriebenen Effekts führt.

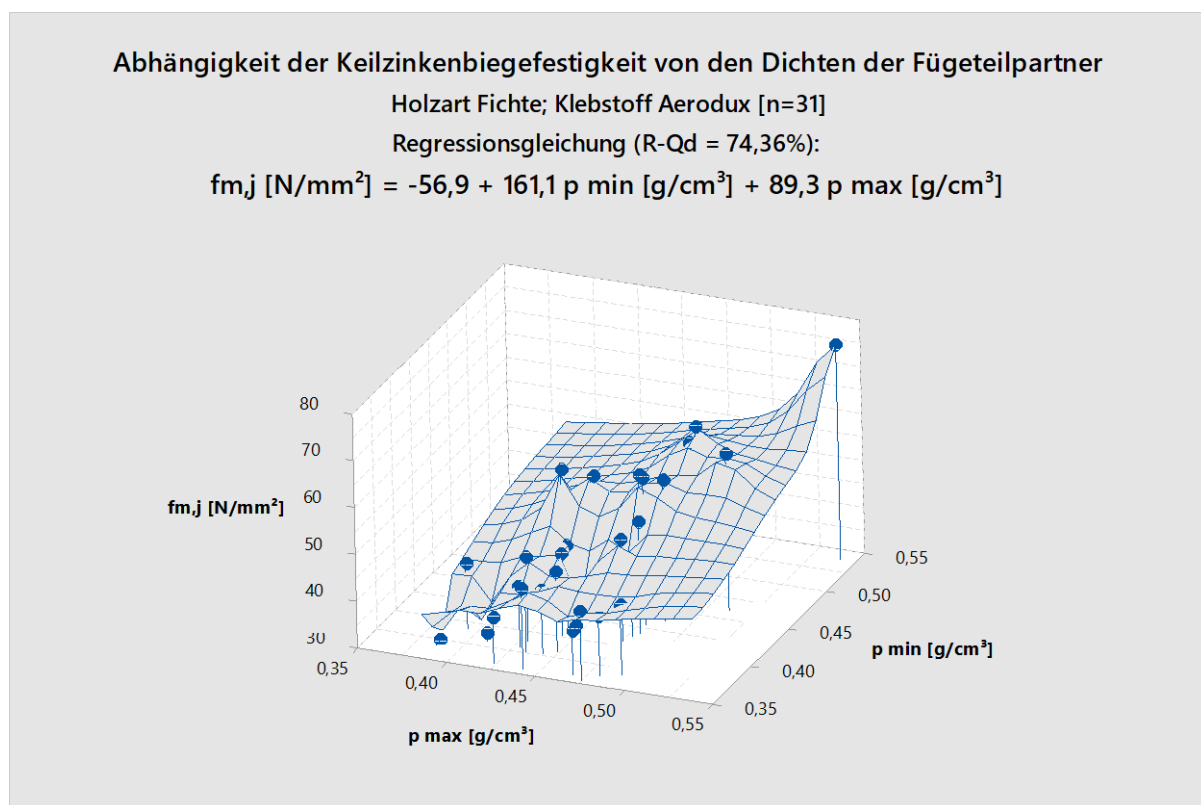


Abbildung 102: Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von den Dichten der Fügepartner

Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von den Elastizitätsmoduln der Fügeteilpartner

Holzart Fichte; Klebstoff Aerodux [n=31]

Regressionsgleichung (R-Qd = 73,87%):

$$f_{m,j} [N/mm^2] = 3,53 + 0,004166 E_{min} [N/mm^2] + 0,001447 E_{max} [N/mm^2]$$

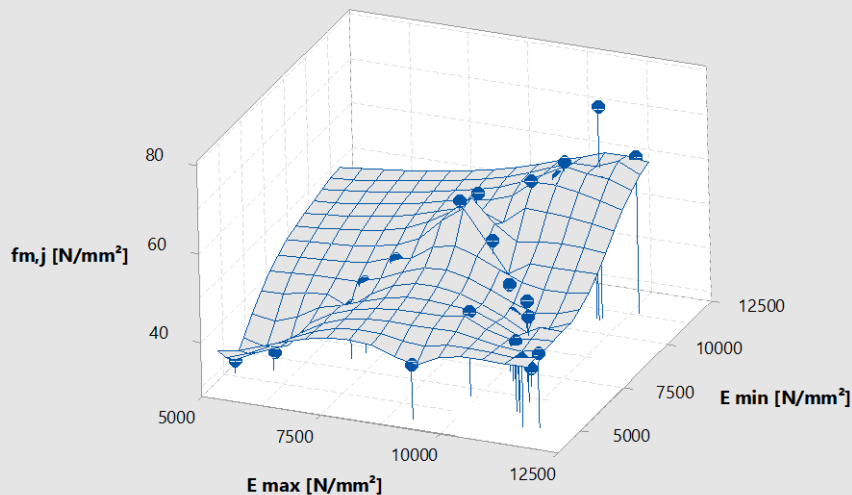


Abbildung 103: Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von den Elastizitätsmoduln der Fügeteilpartner

Für die Einschätzung der Keilzinkenbiegefestigkeit über die Biegesteifigkeit der Fügeteilpartner konnte nachfolgende Regressionsgleichung für das Keilzinkenprofil I-15 abgeleitet werden:

$$f_{m,j} = 3,53 + 0,004166 E_{min} [N/mm^2] + 0,001447 E_{max} [N/mm^2] \quad [RQ-d = 73,87 \, \%]$$

Für E_{min} und $E_{max} = 16.500 \, N/mm^2$ läge die Keilzinkenbiegefestigkeit bei $96,14 \, N/mm^2$, was sich mit den Ergebnissen aus Kap. 3.3.3, Reihe MUF, Buche = $f_{m,j,mittel} = 96,4$ deckt.

Für $E_{min} = 11.000$ und $E_{max} = 16.500 \, N/mm^2$ läge die Keilzinkenbiegefestigkeit bei $73,23 \, N/mm^2$. In Kap. 3.3.5, Reihe u = 12 %, liegt die Keilzinkenfestigkeit bei $54,2 \, N/mm^2$ und damit 26 % unterhalb der mittels der Regressionsgleichung berechneten. Die große Abweichung lässt sich aber darauf zurückführen, dass die Verklebung der Liefercharge nicht optimal war (vgl. Anhang, Kap. 3.3.5, S. A-29).

4.2.6.6.3 Dichte und Jahrringbreite

Da bei Nadelhölzern die Dichte und der Elastizitätsmodul (Niemz & Sonderegger, 2017, S. 294) als auch die Dichte und die Jahrringbreite (Knigge & Schulz (1966) zitiert in Niemz & Sonderegger (2017, S. 147)) korrelieren, steigt mit zunehmender Dichte auch die Keilzinkenfestigkeit an (vgl. Abbildung 75, S. 80).

Dichte der Fügeteilpartner bei der Verklebung gleicher Hölzer ³¹

Es wurden Untersuchungen zur Keilzinkenfestigkeit in Fichtenholz durchgeführt. Die Dichte der beiden Fügeteilpartner war gleich. Die Keilzinken wurden mit einem Profil I-15 gefräst und mit Aerodux 185 mit Härter HRP 155 verklebt.

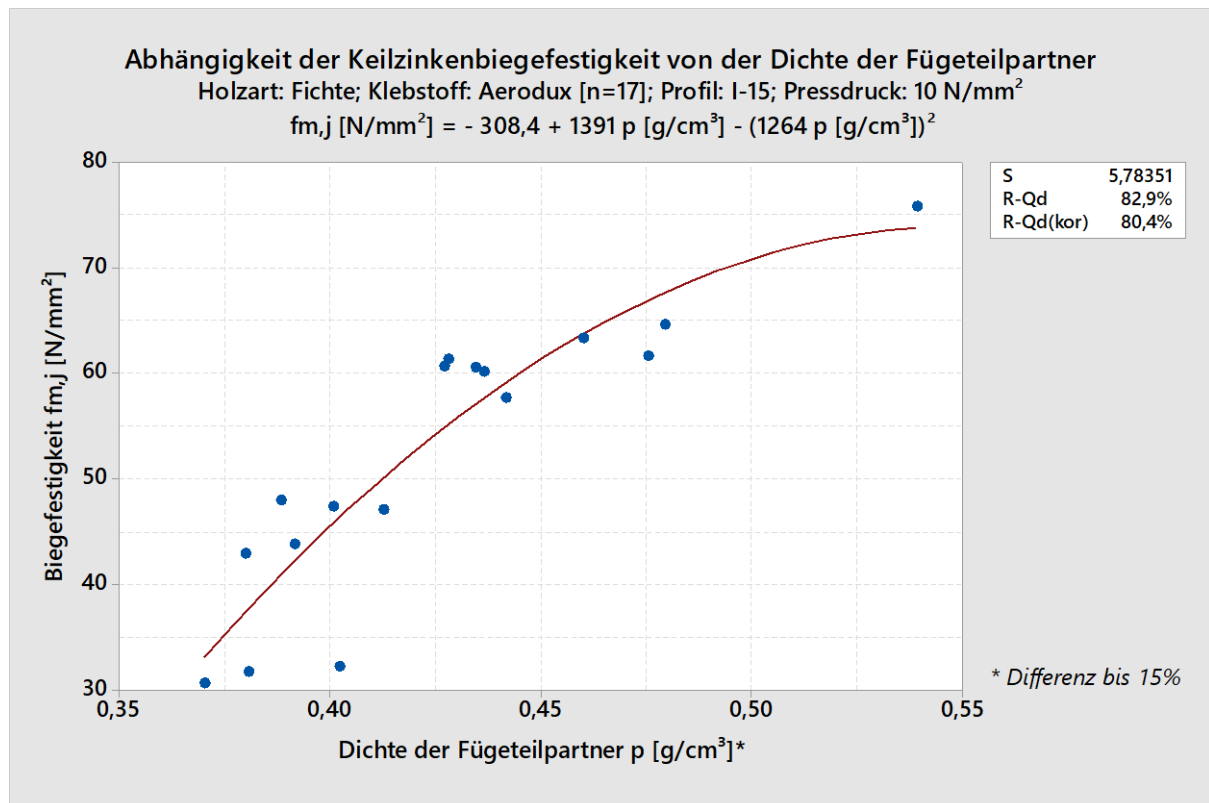


Abbildung 104: Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von der Dichte der Fügeteilpartner

Mit steigender Holzdichte p steigt die Keilzinkenbiegefestigkeit (vgl. Abbildung 104). Der Zusammenhang kann mit nachfolgender Regressionsgleichung beschrieben werden:

Profil I-15

$$f_{m,j} \left[\frac{N}{mm^2} \right] = -308,4 + 131 \times p \left[\frac{g}{cm^3} \right] - (1264 \times p \left[\frac{g}{cm^3} \right])^2 \quad [R-Qd = 82,9 \, \%]$$

Dichte des Fichtenprüfkörpers bei der Verklebung von Fichte mit KP ³²

An Keilzinkenverbindungen zwischen Fichtenholz und KP wurde im Rahmen eines Zugversuches nach dem Probenbruch die Dichte der nativen Fichte im unmittelbaren Bereich der Keilzinkenverbindung bestimmt. Es zeigte sich nachfolgende Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Dichte des nativen Holzes:

³¹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.3.7, S. A-33, Kollektiv 1

³² vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.3, S. A-19, Reihen C, C1 und C2

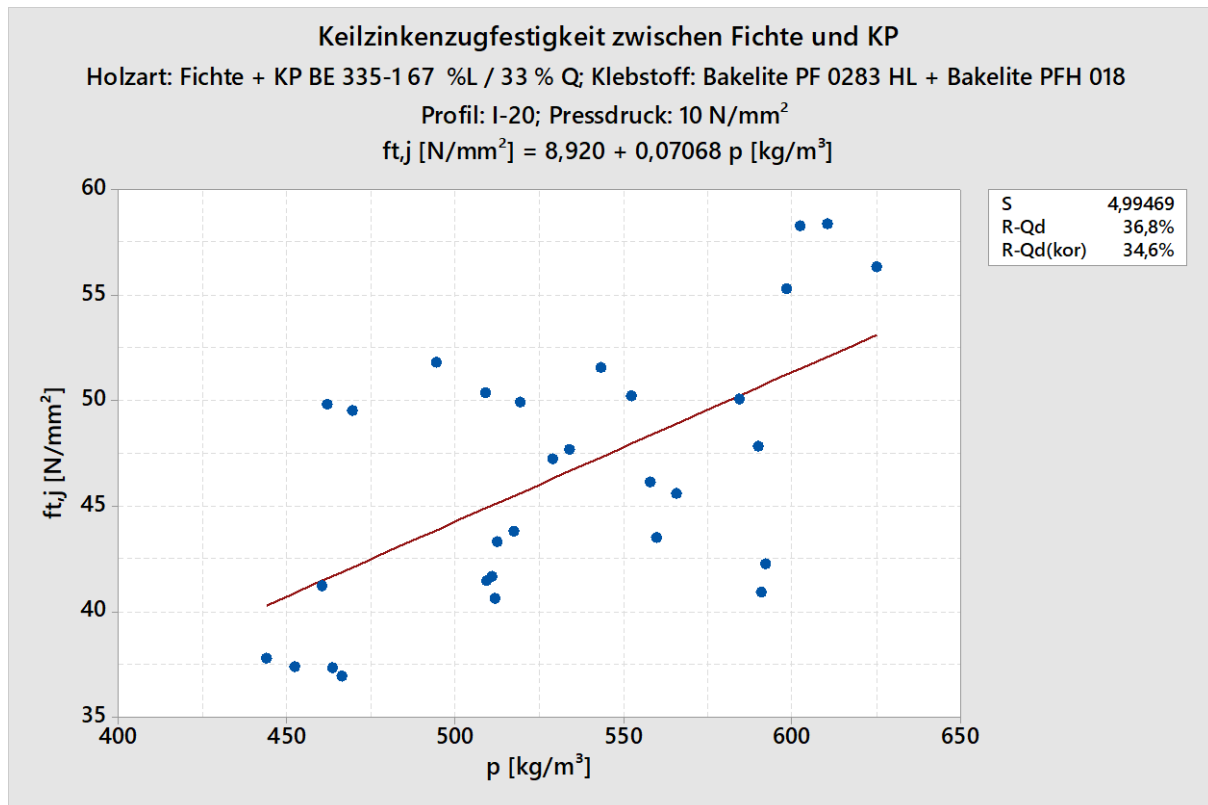


Abbildung 105: Abhängigkeit der Keilzinkenzugfestigkeit von der Holzdichte

Die Keilzinkenzugfestigkeit in Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP steigt mit Zunahme der Dichte des nativen Holzes. Aus dem Datenmaterial konnte für das I-20-Profil nachfolgende Regressionsgleichung abgeleitet werden:

$$f_{t,j} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 8,920 + 0,07068 \times p \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right] \quad [\text{R-Qd} = 36,8 \, \%]$$

Versuche zeigten, dass die Zugfestigkeit einer Keilzinkenverbindung zwischen KP und Fichte mit der Jahrringbreite der Fichte negativ korreliert (vgl. Abbildung 108, S. 108). Je kleiner die Jahrringbreite ist, desto höher ist die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung. Es konnte nachfolgende Regressionsgleichung entwickelt werden:

$$f_{t,j} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 66,98 - 17,27 \cdot b[\text{mm}] + (2,595 \times b[\text{mm}])^2 \quad [\text{R-Qd} = 60,1 \, \%]$$

b = Jahrringbreite

Desweiteren belegten Bruchbilder an Keilzinkenverbindungen in nativem Fichtenholz (vgl. Abbildung 106) Holzversagen im niederlichten Frühholzanteil und Klebstoffversagen am höherdichten Spätholzanteil.



Abbildung 106: Bruch einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte & Fichte

Bei Nadelholz liegt die Dichte des Frühholzes im Allgemeinen bei etwa einem Drittel der Dichte des Spätholzes (vgl. Knigge & Schulz, 1966, zitiert nach Niemz & Sonderegger 2017, S. 146). Die Jahrringbreite setzt sich aus der Breite des Frühholzes und der Breite des Spätholzes zusammen. Die Breite des Frühholzes wird durch die Vegetationsphase bestimmt; je länger die Temperaturen über dem Gefrierpunkt liegen, desto stärker ist der Frühholzbereich ausgeprägt. Auf die Breite des Spätholzes hat die Vegetationsphase einen deutlich geringeren Einfluss. Die Breite des Spätholzes ist in etwa konstant (vgl. Lewark, 1982). Bei kleineren Jahrringbreiten ist der prozentuale Anteil an Spätholz und damit auch die über den Querschnitt gemittelte Festigkeit demnach höher. Aus diesem Zusammenhang heraus kann hergeleitet werden, dass Kräfte in einer Verklebung von Hölzern in erster Linie über den Spätholzanteil abgetragen werden. Im Bereich der Klebung von Spätholz mit Spätholz, also mechanisch gleichwertiger Klebpartner, können durch das feste Spätholz hohe Kräfte übertragen werden; hier stellt der Klebstoff die Schwachstelle dar. Im Bereich der Klebung zwischen Spätholz und Frühholz wird die zu übertragende Kraftgröße durch die geringeren Festigkeitseigenschaften des Frühholzes begrenzt; hier stellt das Frühholz die Schwachstelle dar.

In Abbildung 107 a) ist in schwarzer Strichführung schematisch der Spätholzanteil eines Fichtequerschnitts abgebildet, der weiße Bereich zwischen dem Spätholz stellt das Frühholz dar. Bei der Verklebung von Fichte mit KP trifft das Spätholz der Fichte immer auf hochdichtes und hochfestes KP und damit einen Klebpartner mit hohen mechanischen Eigenschaften (vgl. Abbildung 107 b), rot markiert). Bei der Verklebung von Fichte und Fichte trifft hingegen immer nur ein Teil des Spätholzes auf Holz gleicher Festigkeiten (vgl. Abbildung 107 c), rot markiert). Im überwiegenden Teil der Klebfuge trifft festes Spätholz auf niederfestes Frühholz. Hier können also nur punktuell hohe Klebfestigkeiten erreicht werden.

Der Leistungsabfall infolge erhöhter Spannungsspitzen in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP im Vergleich zu einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und Fichte, wird durch die Vergrößerung der Spätholzklebefläche kompensiert.

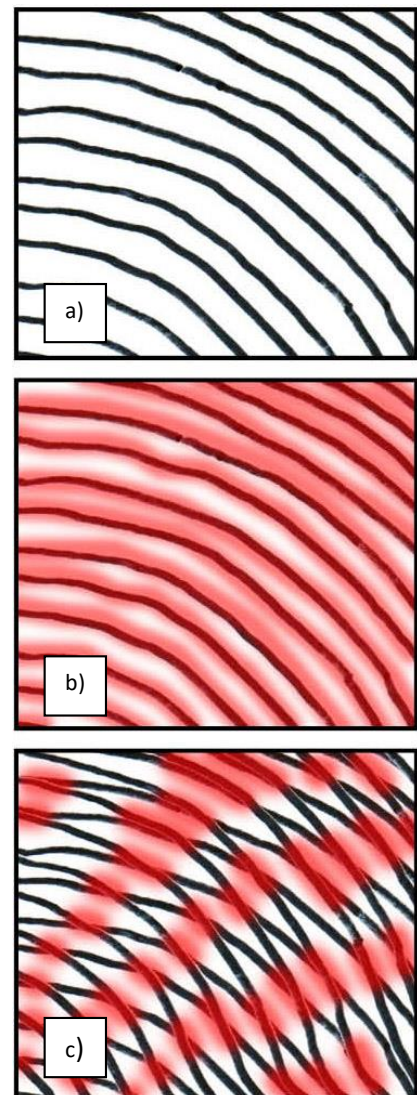


Abbildung 107: Schema Verklebung

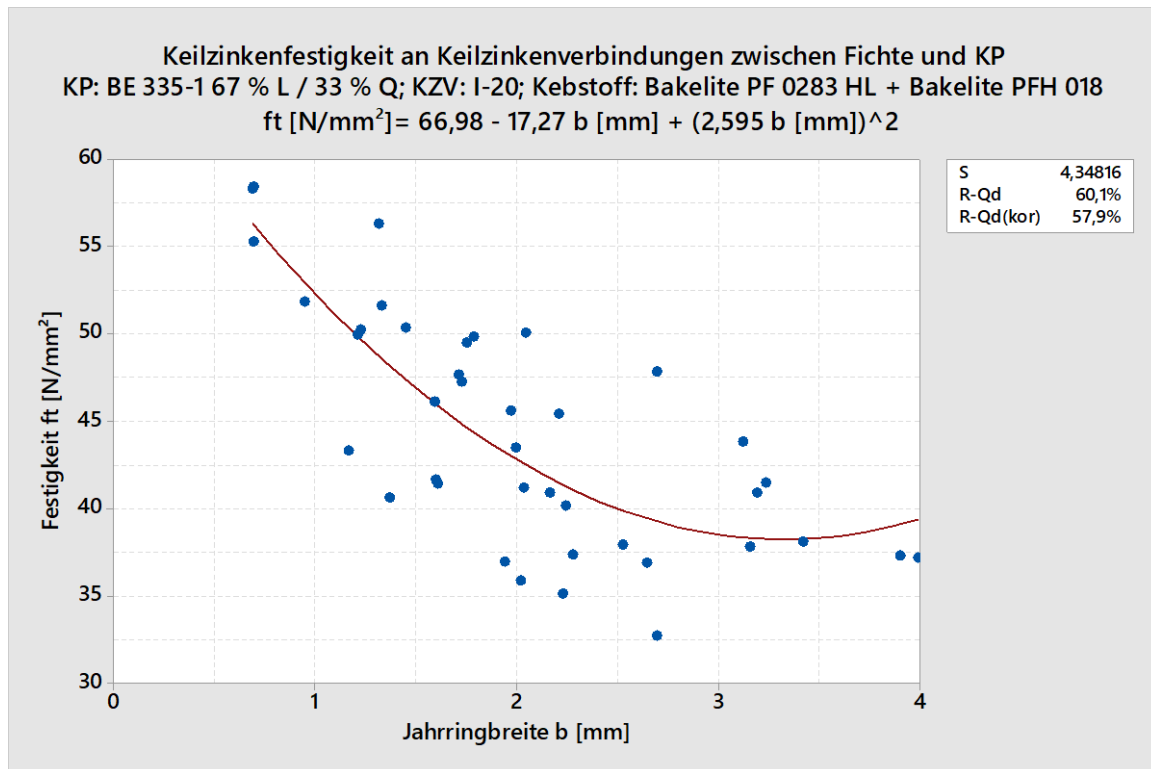


Abbildung 108: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit zwischen Fichte und KP von der Jahringbreite

4.2.6.7 Einfluss der Holztemperatur und der Holzfeuchte

4.2.6.7.1 Holztemperatur

Da die Veränderung der Holztemperatur in der Nutzungsklasse 1 und auch in der Nutzungsklasse 2 sehr gering ist, sind Veränderungen, wie beispielsweise die des Elastizitätsmoduls, damit ebenfalls sehr gering und können deshalb weitgehend vernachlässigt werden. Grundsätzlich führt ein Anstieg der Temperatur zu einem Abfall des Elastizitätsmoduls (vgl. Kap. 3.1) und damit zu einer Verringerung der Keilzinkenfestigkeit.

4.2.6.7.2 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte hat maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen. Mit Zunahme der Holzfeuchte sinken Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften (vgl. Kap. 3.1). Gegenüber einer Holzfeuchte von $u = 5\%$ sinken die Druck- und Biegefestigkeit bis zur Fasersättigung etwa linear um ca. 2 % bei einer Zunahme der Holzfeuchte u um 1 % (vgl. Abbildung 23, S. 28). Unterhalb einer Holzfeuchte von $u = 5\%$ nehmen bei Fichtenholz die Druck- und Biegefestigkeit nur noch geringfügig zu (Kollmann (1951), zitiert in Niemz & Sonderegger (2017, S. 345)).

In Kap. 4.2.6.6 wurde der Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die Festigkeitseigenschaften von Keilzinkenverbindungen beschrieben. Da mit steigender Holzfeuchte eine Abnahme des Elastizitätsmoduls einhergeht, wirken sich auch Veränderungen der Holzfeuchte auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen aus.

Einfluss der Holzfeuchte auf die Keilzinkenbiegefestigkeit von mit PUR-Klebstoff verklebten Buchenholzquerschnitten

An keilgezinkten Buchenholzquerschnitten wurde die Abhängigkeit der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit der Keilzinkenverbindung untersucht³³. Die Keilzinken wurden bei einer Holzfeuchte von $u = 10\%$ gefräst und unmittelbar nach dem Fräsen mit einem PUR-Klebstoff verklebt. Nach dem Aushärten des Klebstoffes wurden die Prüfkörper im Trockenschrank bis zur Vierpunkt-Biegeprüfung auf $u = 0\%$, im Klimaschrank auf $u = 9\%$ und $u = 14\%$ und im Wasserbad auf $u > 30\%$ konditioniert.

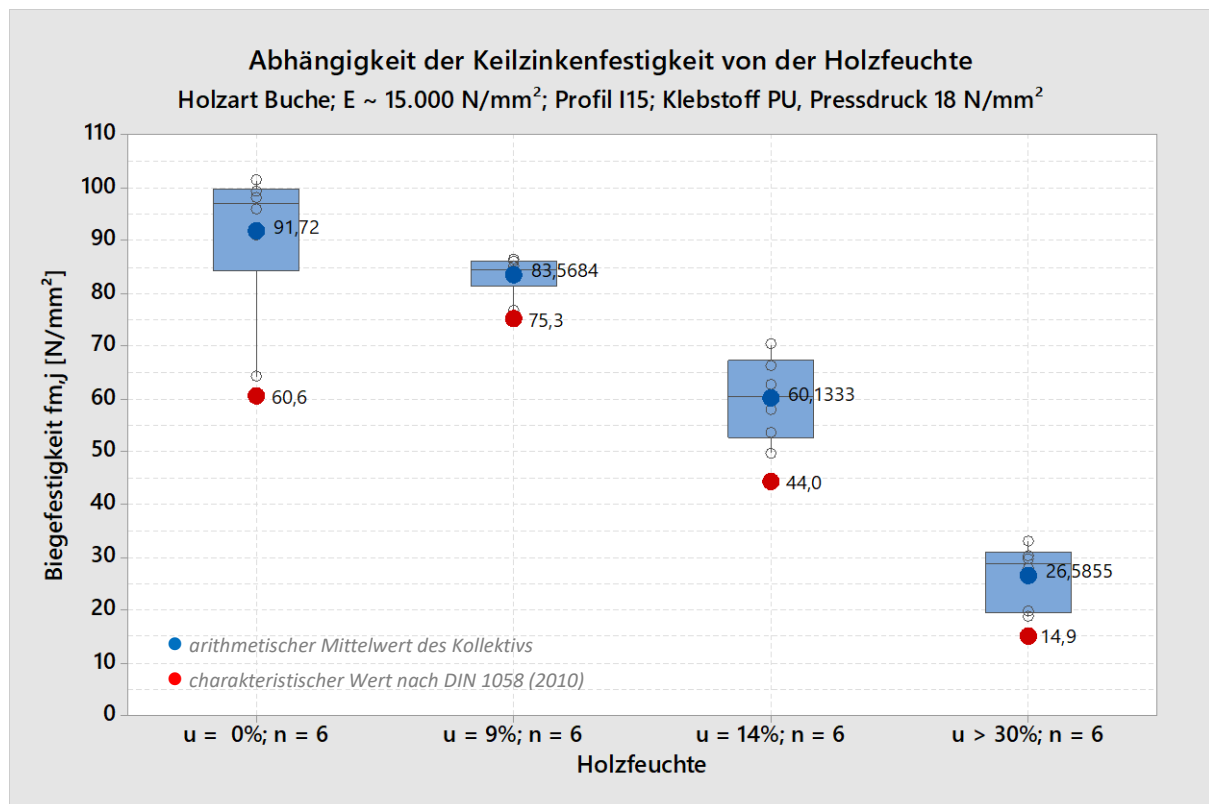


Abbildung 109: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Holzfeuchte

Die höchsten Keilzinkenbiegefestigkeiten wurden im darrtrockenen Zustand erreicht. Mit steigender Holzfeuchte nahmen die Keilzinkenbiegefestigkeiten bis zum Erreichen der Fasersättigung in etwa linear ab (vgl. Abbildung 109). Die Ursache der Abnahme liegt primär im Aufweichen der Zellwände und der damit verbundenen Reduktion der Steifigkeit. Der Zusammenhang kann mit nachfolgender Regressionsgleichung beschrieben werden:

Profil I-15

$$f_{m,j} \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] = 95,88 - 2,278 \times u [\%] \quad [R\text{-}Qd = 87,8 \%]$$

Von $u = 0\%$ bis $u = 30\%$ sinkt die Keilzinkenbiegefestigkeit um ca. 2% je 1% Holzfeuchtezunahme und bezogen auf die Biegefestigkeit im darrtrockenen Zustand.

Die Ergebnisse wurden an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 in Buchenholz und unter Verwendung von Aerodux-Klebstoff verifiziert (vgl. Abbildung 110, S. 110)

³³ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.3.2, S. A-26

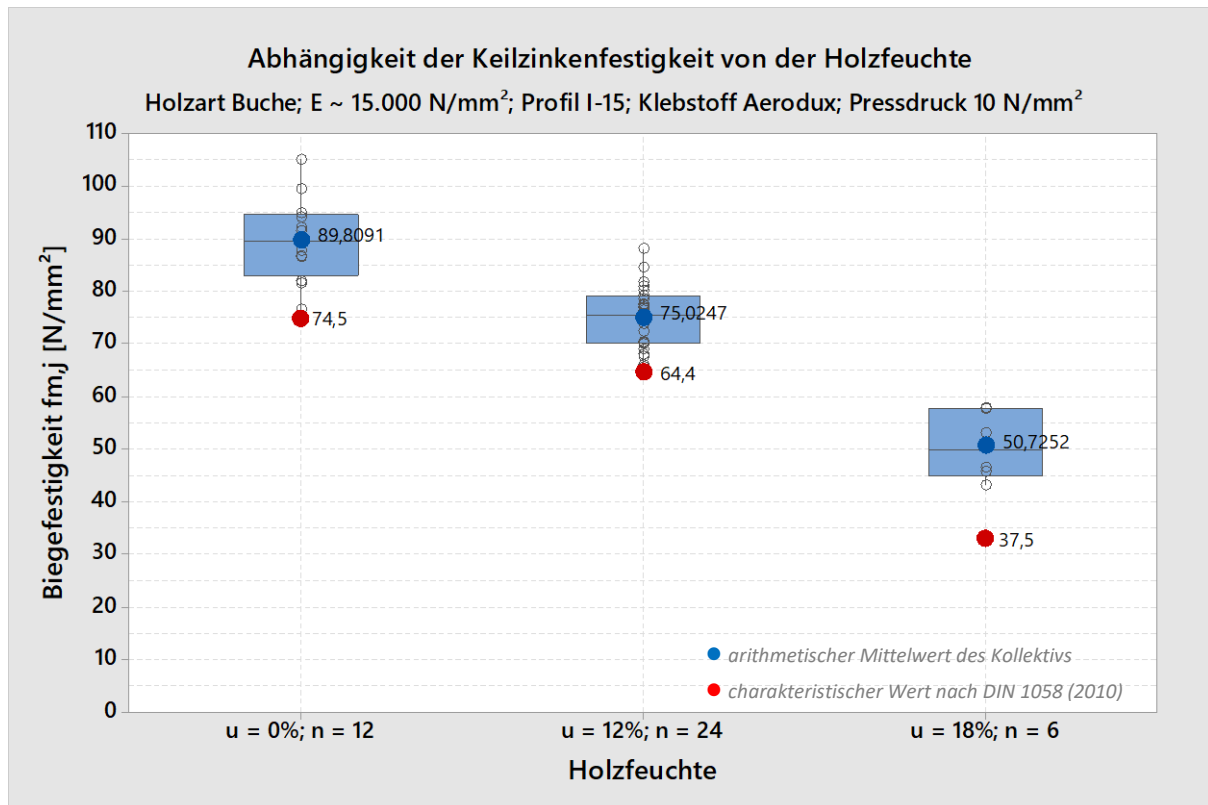


Abbildung 110: Abhängigkeit der Keilzinkenfestigkeit von der Holzfeuchte

Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-20.

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-20 zu beurteilen, wurden Biegeprüfungen an unterschiedlich konditionierten Prüfkörpern durchgeführt ³⁴ (vgl. Abbildung 111, S. 111).

An Keilzinkenverbindungen des Typs I-20 zwischen Fichte und KP konnte im Vergleich zu den Untersuchungen an Keilzinkenverbindungen in Buchenholz ein nur unwesentlicher Anstieg der Biegefestigkeit bei Abnahme der Holzfeuchte verzeichnet werden.

In Abbildung 112, S. 111 sind die innerhalb der Prüfreihe dokumentierten Biegefestigkeiten in Abhängigkeit der Dichte des Fichtenholzes und in Abhängigkeit der Holzfeuchte des Fichtenholzes als Streudiagramm dargestellt. Mit Zunahme der Dichte stieg die Biegefestigkeit an. Mit Abnahme der Holzfeuchte konnte ein vergleichsweise geringer Anstieg der Biegefestigkeit dokumentiert werden ³⁵.

³⁴ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.3.6, S. A-31

³⁵ In Flachkantbiegeversuchen (FK) konnten ca. 1,2-fach höhere Festigkeiten als bei Hochkantbiegeversuchen (HK) ermittelt werden.

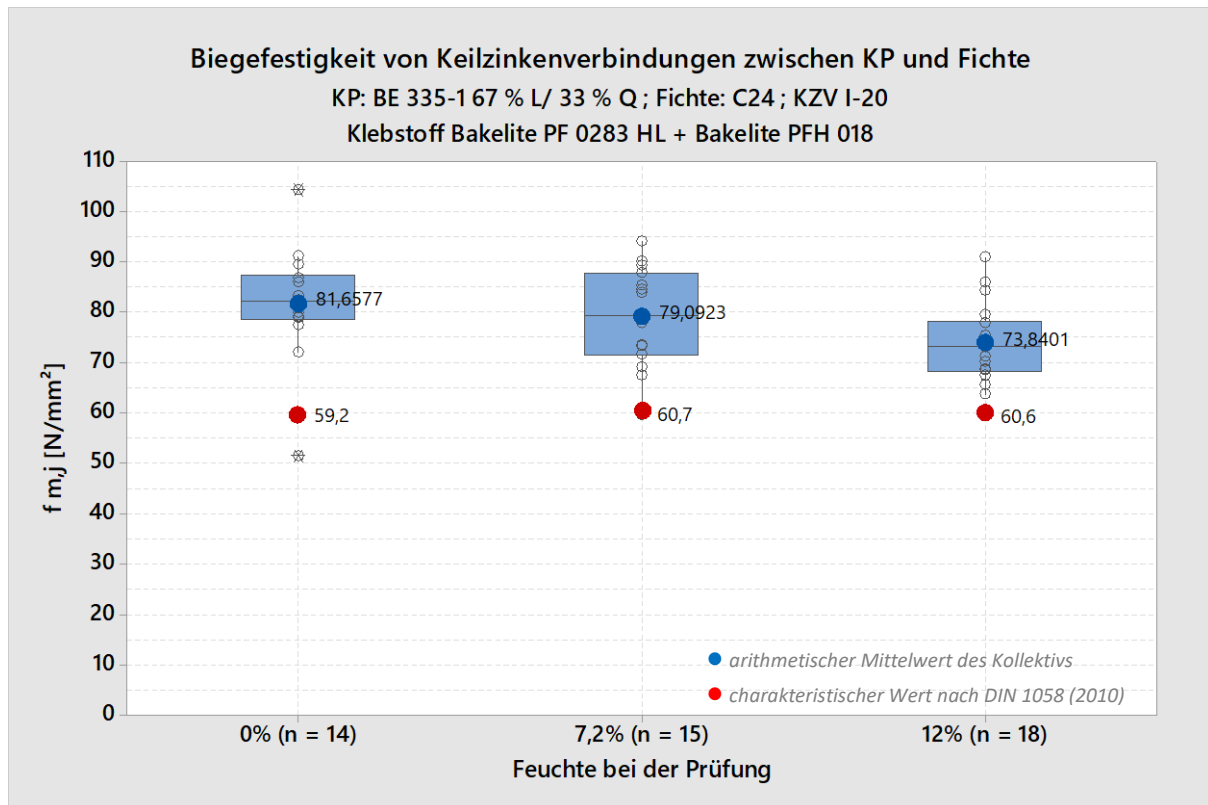


Abbildung 111: Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen KP und Fichte

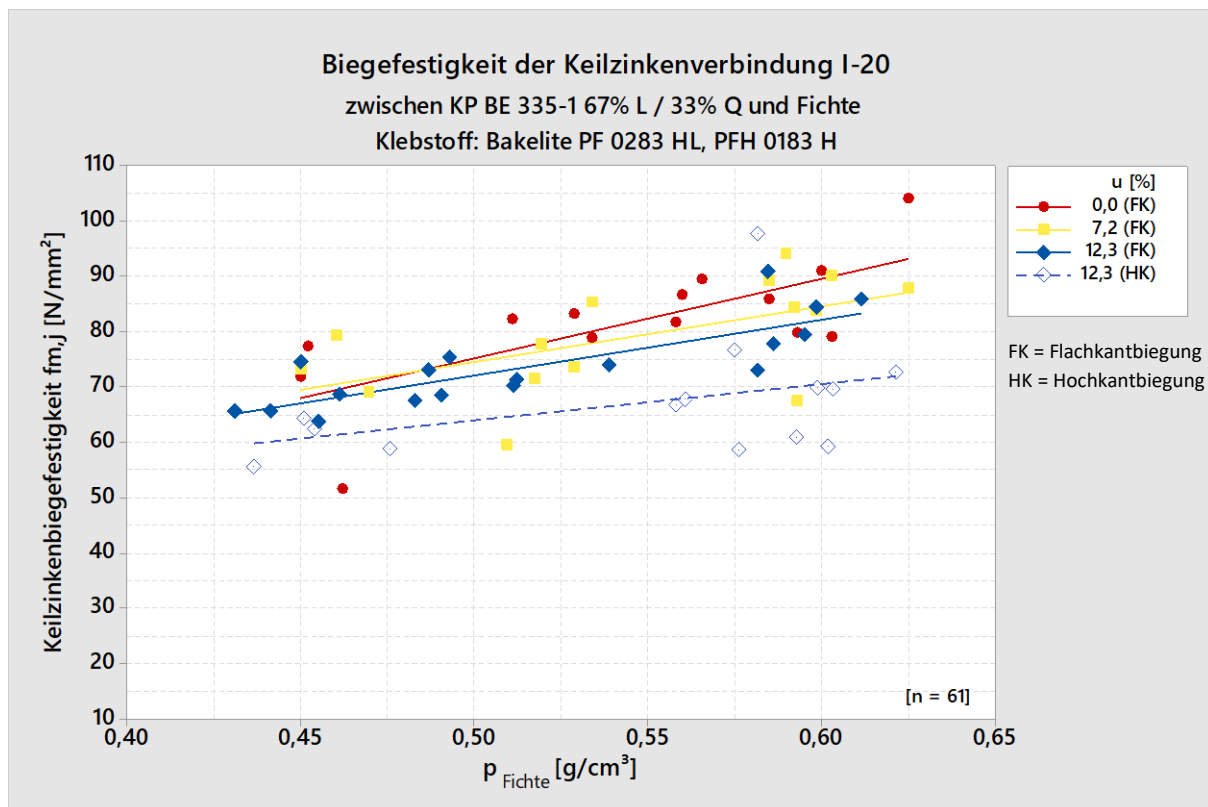


Abbildung 112: Abhängigkeit der Keilzinkenbiegefestigkeit von der Dichte und der Holzfeuchte des nativen Fichtenholzes

Der vergleichsweise geringe Einfluss der Abnahme der Holzfeuchte (vgl. Abbildung 110 und Abbildung 111) auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP lässt sich wie folgt erklären:

Bei Feuchteabnahme unterhalb des Fasersättigungspunktes schwindet Holz. Das Schwindverhalten ist nach Halász & Scheer (1996), zitiert in Niemz & Sonderegger (2017, S. 101, f.) in tangentialer Richtung größer als in radialer Richtung; in axialer Richtung ist es am kleinsten. In Abbildung 113 a) - d) ist ein Teilbereich einer Keilzinkenverbindung skizziert. Bei einer Verklebung zweier gleicher Materialien sind die Schwindverformungen in beiden Fügeteilpartnern der Keilzinkenverbindung in X-Richtung, in Y-Richtung und in Z-Richtung gleich (Abbildung 113, b)). Schwind- oder Quellbeanspruchungen wirken sich daher nicht auf die Klebfuge aus.

KP trocknet sehr viel langsamer als natives Holz, das Schwindmaß fällt zudem deutlich geringer aus, dies führt dazu, dass die beiden Querschnitte unterschiedlich stark schwinden (Abbildung 113, c)). Die Folge ist, dass sich Schwindspannungen in der Keilzinkenspitze des nativen Nadelholzes einstellen (Abbildung 113, d)), die zum Querszugriss des nativen Fichtenholzes oder zum Versagen der Klebfuge führen können.

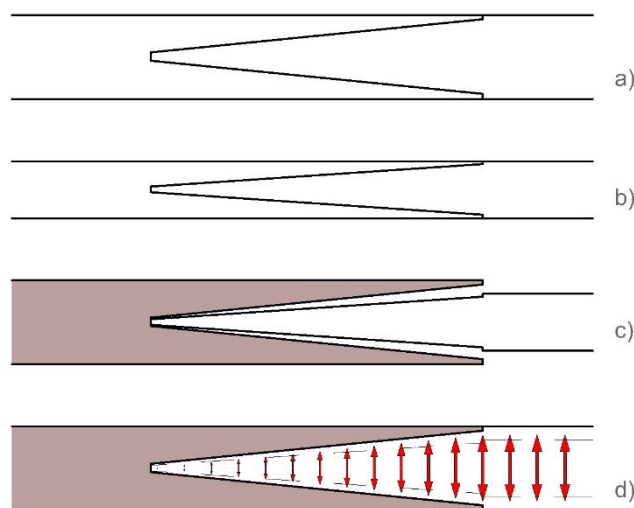


Abbildung 113: Prinzip Schwindspannung in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP

In Abbildung 114, S. 113 ist die Schwindverformung in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichtenholz und KP bei einer Holzfeuchteabnahme von 5 % dargestellt. Die Untersuchung wurde an einem Prüfkörper der Prüfreihe C (vgl. Anhang, Kap. 3.2.3, S. A-19) durchgeführt. Die Verklebung wurde bei einer nativen Holzfeuchte von ca. 12 % ausgeführt. Im Anschluss wurde der verklebte Fichten-KP-Querschnitt gehobelt und danach getrocknet bis das native Holz eine Holzfeuchte von ca. 7 % aufwies. Nach dem Trocknen zeigten sich an der Oberfläche (s. Abbildung 114, X-Y-Ebene) Querschnittsveränderungen infolge des Schwindens am Fichtenholz in Z-Richtung. An KP konnte keine Querschnittsveränderung dokumentiert werden. Die Schwindverformung des Fichtenholzes wurde an der Oberfläche in Richtung der Abbildungsebene (X-Y-Ebene) gemessen und betrug in Z-Richtung ca. 0,03 mm. Eine Öffnung der Klebfuge stellt sich infolge des Schwindens ein, hier konnte ein Riss mit 0,015 mm Breite dokumentiert werden.

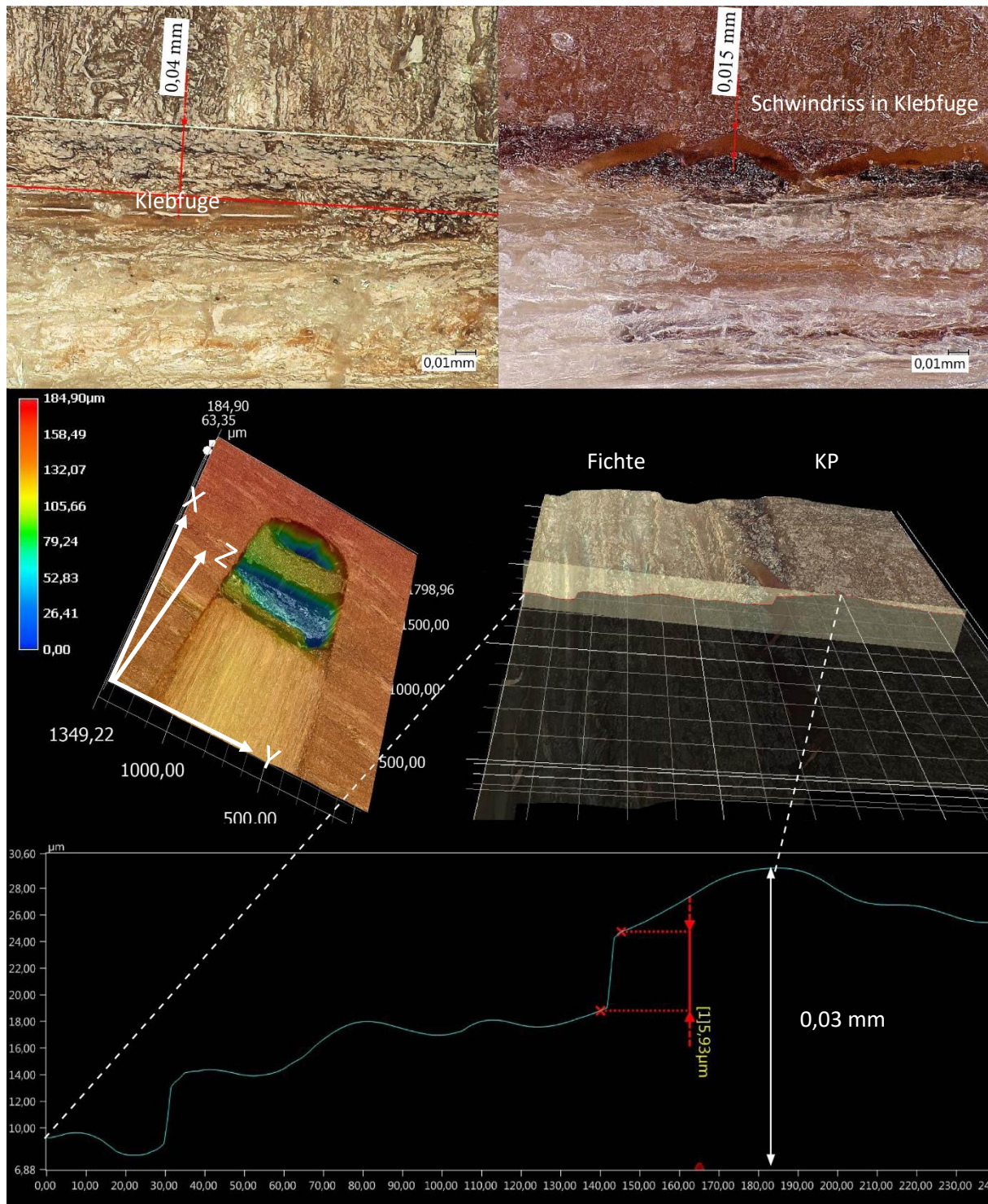


Abbildung 114: Schwindverformung in einer Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP

Die Wirkung von Schwinden und Quellen auf die Keilzinkenfestigkeit ist erheblich. Daher sind die nachfolgenden Untersuchungen notwendig:

Einfluss der Holzfeuchte auf die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-15 ³⁶.

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-15 zu beurteilen, wurden Zugprüfungen an unterschiedlich konditionierten Prüfkörpern (s. Tabelle 12) wie auch Delaminationsprüfungen für Keilzinkenverbindungen, in Anlehnung an DIN EN 301 (2018) durchgeführt (vgl. Abbildung 115).

Tabelle 12: Konditionierung der Prüfkörper während der Herstellung und der Prüfung

	Reihe	N	W1	W2	W3	W4	
Herstellung	Konditionierung	20°C / 45%	20°C / 65%	20°C / 65%	20°C / 65%	20°C / 65%	Wasserlagerung 8h 100°C
	Holzfeuchte u [%]	8%	12%	12%	12%	12%	
Prüfung	Konditionierung	20°C / 45%	20°C / 65%	20°C / 45%	20°C / 90%	20°C / 65%	Wasserlagerung 8h 20°C
	Holzfeuchte u [%]	8%	12%	8%	18%	12%	

Während sich die Delaminationsprüfung auf die Öffnung der Klebfuge konzentriert (vgl. Abbildung 115, rechts), wurden die der Kochprüfung unterzogenen Prüfkörper nach der Dokumentation der Fugenöffnung auf $u = 12\%$ konditioniert und anschließend zusätzlich einer Zugprüfung unterzogen um den realen Festigkeitsabfall quantifizieren zu können.

Die höchste mittlere Festigkeit wie auch die höchste charakteristische Festigkeit, konnte an Charge N ermittelt werden und damit an Prüfkörpern, die sowohl bei einer Holzfeuchte von 8% hergestellt als auch geprüft worden sind. Demgegenüber zeigte sich eine etwa 20% geringere mittlere als auch charakteristische Festigkeit an Prüfkörpern der Charge W1, also Prüfkörper, die bei einer Holzfeuchte von 12% hergestellt wie auch geprüft worden sind.

Ein Vergleich der Chargen W1, W2, W3 und W4 untereinander zeigte, dass mit einer Steigerung der Holzfeuchte von 12% (W1) auf 18% (W3) die mittlere Keilzinkenfestigkeit um ca. 12% abnimmt, während eine Abnahme der Holzfeuchte auf 8% (W2) zu keiner Steigerung der Keilzinkenfestigkeit führte (vgl. Abbildung 116 S. 115).

Innerhalb der Delaminationsprüfung zeigte sich eine mittlere Fugenöffnung von $7,7\%$ (Anforderung $< 10\%$) und eine maximale Fugenöffnung von $14,3\%$ (Anforderung $< 15\%$). Zudem zeigten sich dauerhafte Quellverformungen der Keilzinkenspitzen aus KP (vgl. Abbildung 115, links). Die anschließende Zugprüfung bei $u = 12\%$ (W4) ergab eine Abnahme der Keilzinkenfestigkeit von ca. 8% infolge der Kochprüfung.

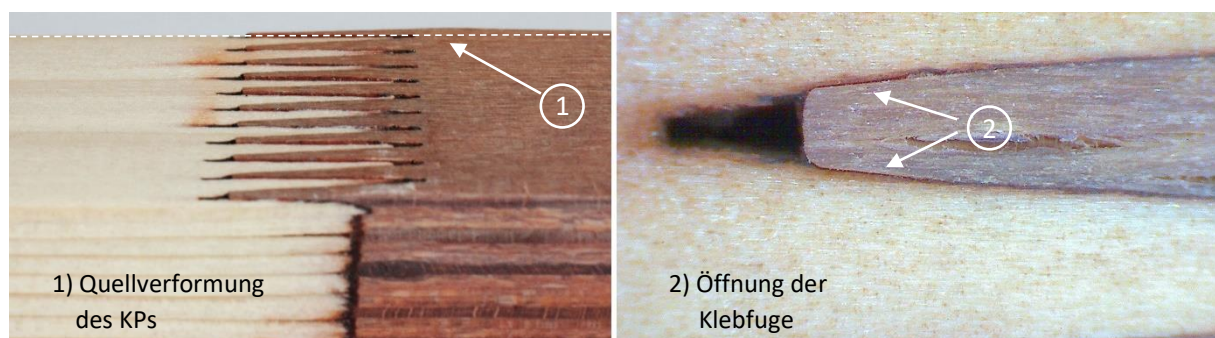


Abbildung 115: Keilzinkenverbindung nach der Kochbehandlung (Reihe W4)

³⁶ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.2.5, S. A-22 und Kap. A-3.1.3, S. A-16

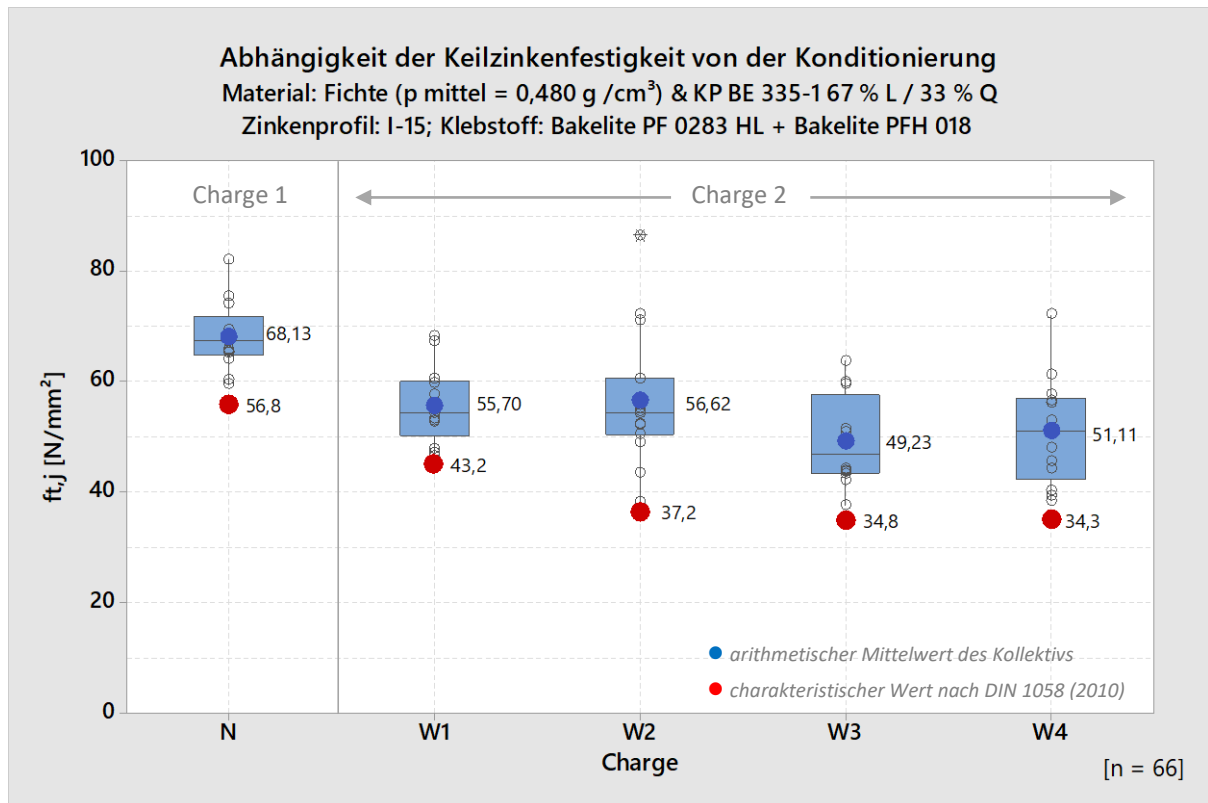


Abbildung 116: Vergleich der Chargen N, W1, W2, W3, W4

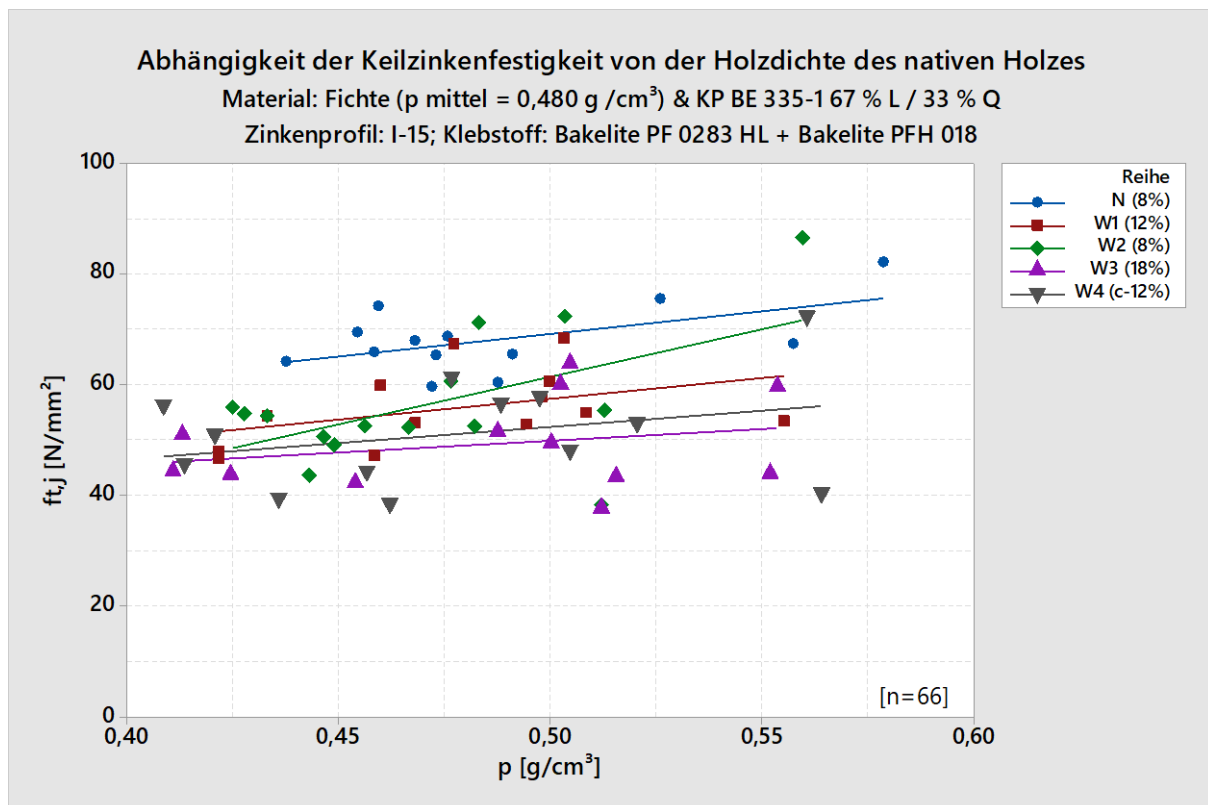


Abbildung 117: Darstellung der Ergebnisse aus den Versuchen der Reihen N, W1, W2, W3, W4

Über alle Chargen hinweg konnte eine signifikante Zunahme der Keilzinkenfestigkeit mit Zunahme der Dichte des nativen Holzes verzeichnet werden (vgl. Abbildung 117).

Interpretation der Ergebnisse

Die Verklebung von Keilzinken muss nach DIN EN 15497 (2014, S.42) bei einer Holzfeuchte zwischen 7 % und 18 % erfolgen; dabei darf „Der Feuchtegehalt von zwei Holzstücken, die miteinander verklebt werden sollen, [. . .] um nicht mehr als 5 % abweichen.“ (DIN EN 15497, 2014, S. 42) Der Hinweis auf eine maximale Feuchtespreizung von 5 % erklärt sich dadurch, dass durch das Angleichen der Holzfeuchten und durch das Schwinden des feuchteren Querschnitts, Querkzugspannungen auf die Klebfuge erzeugt werden, die zum vorzeitigen Versagen der Klebverbindung führen können.

Bewertung des Kochversuches zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit der Klebfuge

Nach dem Kochversuch zeigte sich an allen Prüfkörpern eine deutlich plastisch irreversible Quelldeformation des KPs im Bereich der Keilzinkenspitzen. Da ausschließlich um die Zinkenspitze ein Aufquellen stattgefunden hat - und im übrigen Bereich des Prüfkörpers nachweislich kein dauerhaftes Aufquellen stattgefunden hat - ist davon auszugehen, dass die Deformation durch die native Holzquellung und die Quellspannung quer zur Keilzinkenfuge ausgelöst worden ist. In der Baupraxis werden Holzfeuchten oberhalb der Fasersättigung und Temperaturen um 100 °C beim Einsatz in der Nutzungsklasse 1 und der Nutzungsklasse 2 nicht erreicht. Insofern stellt der Versuch eine enorme Belastung auf die Klebfuge - auf Holz und KP dar - die fern einer baupraktischen Nutzung ist. Unter diesem Hintergrund ist eine Festigkeitsminderung um 8 % als äußerst gering zu interpretieren.

Einfluss der Holzfeuchte auf die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-15 ³⁷.

Um den Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP unter Verwendung des Profils I-15 zu beurteilen, wurden Biegeprüfungen an unterschiedlich gelagerten Prüfkörpern durchgeführt (vgl. Abbildung 118, S. 117). Die Prüfkörper wurden bei einer Holzfeuchte des nativen Holzes von $u = 12\%$ hergestellt und dann entweder auf $u = 0\%$ heruntergetrocknet oder auf $u = 21\%$ aufgefuechtet oder die Holzfeuchte wurde konstant auf $u = 12\%$ gehalten. Ein Teil der Prüfkörper wurde darrgetrocknet und anschließend wieder auf $u = 12\%$ konditioniert.

An Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 zwischen Fichte und KP konnte kein Anstieg der Biegefestigkeit bei Abnahme der Holzfeuchte beobachtet werden. Stattdessen zeigte sich an den darrgetrockneten Prüfkörpern eine Abnahme der Festigkeit um ca. 11 %. Die Charge, die zunächst darrgetrocknet wurde und anschließend auf eine Holzfeuchte von 12 % konditioniert wurde, zeigte eine 12 % geringere Biegefestigkeit als die Referenzcharge, die keinem Feuchtewechsel unterzogen wurde. Die Prüfkörper, die auf eine Holzfeuchte von $u = 21\%$ aufgefuechtet wurden, zeigten gegenüber den Prüfkörpern mit einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ eine um ca. 20 % geringere Keilzinkenbiegefestigkeit (vgl. Abbildung 118). Die Verschlechterung der Keilzinkenfestigkeit bei Holzfeuchten oberhalb von 12 % lässt sich durch die Abnahme des Elastizitätsmoduls mit Zunahme der Holzfeuchte und der Korrelation aus Keilzinkenbiegefestigkeit und Biege-Elastizitätsmodul erklären. Gleichzeitig wird durch Quellen der Fichte eine Querverpressung auf die Klebfuge hervorgerufen, die sich jedoch positiv auf die Klebfestigkeit der Fuge auswirkt.

³⁷ vgl. Prüfungen in Anhang, Kap. A-3.3.5, S. A-29

Die Abnahme der Biegefestigkeit durch ein einmaliges Darrtrocknen lässt sich durch Rissbildung infolge einer blockierten Schwindung des Nadelholzes im Bereich der Klebfuge und der dauerhaften Schädigung ebendieser erklären.

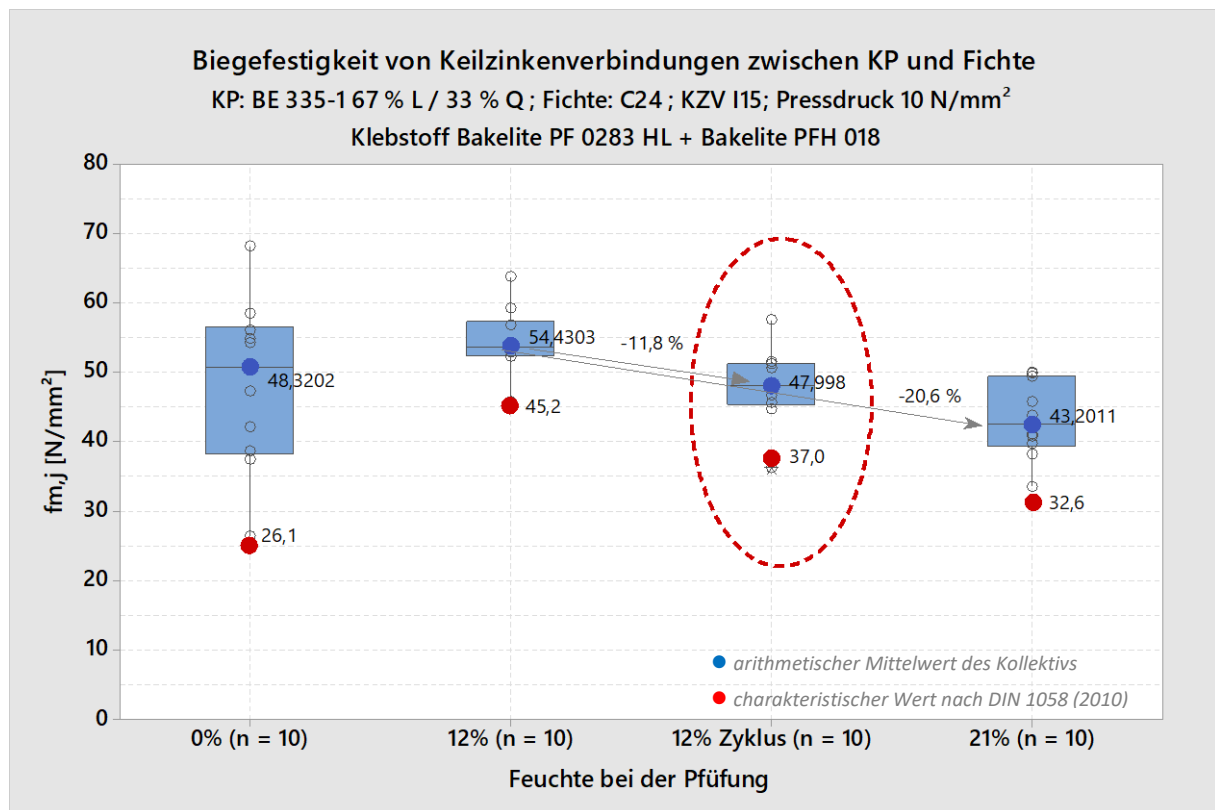


Abbildung 118: Auswirkung von Holzfeuchteveränderungen auf die Keilzinkenfestigkeit zwischen KP und Fichte

Einfluss von Holzfeuchtezyklen³⁸

In der zuvor beschriebenen Versuchsdurchführung hat sich gezeigt, dass das einmalige Darrtrocknen der Prüfkörper zu einer bleibenden Schädigung der Klebfuge, verbunden mit einem bleibenden Abfall der Festigkeit von ca. 12 % führte. In der darauf aufbauenden und im Folgenden beschriebenen Versuchsreihe wurde untersucht, ob zyklische Feuchteschwankungen zu einer fortschreitenden Schädigung der Klebfuge führen. Mit der mehrmaligen zyklischen Belastung wurde eine Prognose für das Langzeitverhalten der Keilzinkenverbindung zwischen KP und nativer Fichte für die Anwendung in der Nutzungsklasse 1 und Nutzungsklasse 2 gestellt.

Die Prüfkörper wurden bei einer Holzfeuchte der nativen Fichte von $u = 12\%$ hergestellt und wie folgt gelagert und geprüft:

Charge A: keine Zyklen; Prüfung bei $u = 12\%$

Charge B: 5 Zyklen von $u = 0\%$ bis $u = 20\%$; Prüfung bei $u = 12\%$

Charge C: 10 Zyklen von $u = 0\%$ bis $u = 20\%$; Prüfung bei $u = 12\%$

Charge C: 15 Zyklen von $u = 0\%$ bis $u > 30\%$; Prüfung bei $u = 12\%$

³⁸ vgl. Prüfungen in Anhang, Kap. A-3.3.5, S. A-29

Anmerkung: Aus Zeitgründen, wurden die Prüfkörper nicht im Klimaschrank auf eine baupraktisch mögliche untere Holzfeuchte von 5% (vgl. Kap. 3.1, S. 31), sondern im Trockenschrank bei 103°C „scharf“ getrocknet.

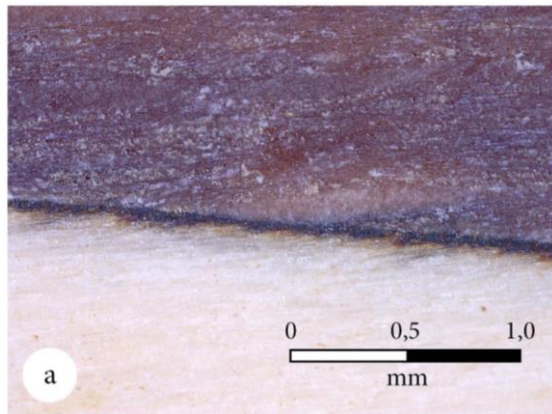


Abbildung 119: Intakte Klebfuge zwischen Fichte und KP

Die Klebfuge zwischen KP wurde sowohl vor als auch nach den unterschiedlichen Konditionierungsbedingungen visuell überprüft. Vor dem Trocknen lagen an den Stichproben keine erkennbaren Beschädigungen der Klebfugen vor. Die Klebfugenstärke lag zwischen 0,03 und 0,05 mm.

Intakte Klebfuge (vgl. Abbildung 119).

Auch nach einer Steigerung der Holzfeuchte auf $u = 20\%$ blieben die Klebfugen intakt.

Nachdem die Prüfkörper im Trockenschrank auf eine Holzfeuchte von 0 % getrocknet wurden, zeigten sich unterschiedliche Schäden im Bereich der Klebfuge und im Querschnitt des nativen Nadelholzes. Hierbei kann in 3 verschiedene Schadbilder der Klebfuge und in 2 verschiedene Schadbilder des nativen Nadelholzquerschnitts differenziert werden:

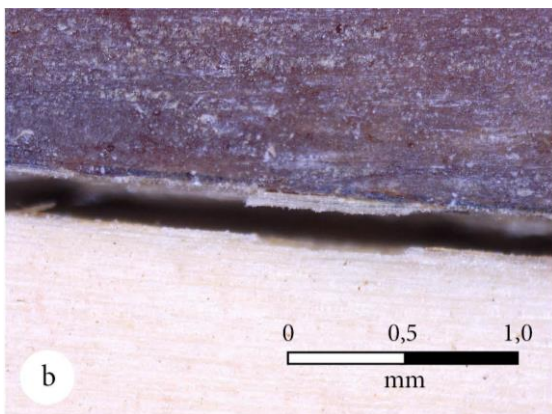


Abbildung 120: Riss nahe der Klebfuge

Schadbild 1 (vgl. Abbildung 120)

Vollständiges Ablösen des Nadelholzes im Bereich der Grenzfläche zwischen Klebstoff und Nadelholz bei intakter Klebschicht. Es haften Holzfasern an der Klebschicht an. → Holzversagen

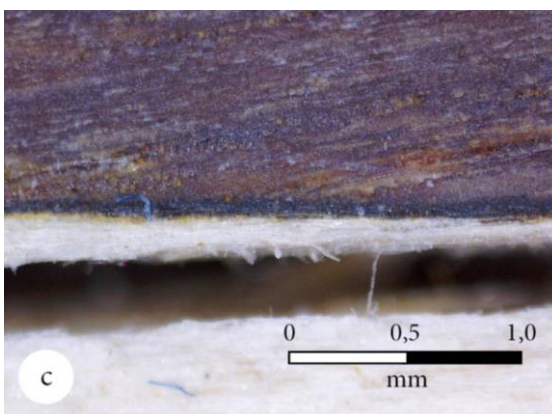
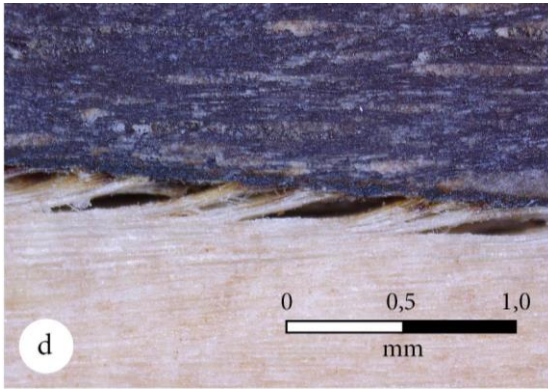


Abbildung 121: Quersugriss im nativen Holz

Schadbild 2 (vgl. Abbildung 121)

Vollständiger Quersugbruch im nativen Nadelholz nahe der Klebschicht, bei vollständig intakter Klebschicht. → Holzversagen



Schadbild 3 (vgl. Abbildung 122)

Kombination aus Schadbild 1 und Schadbild 2.
→ Holzversagen

Abbildung 122: Kombinationsbruch

Schadbild 4 (vgl. Abbildung 123 a und b).

Es zeigten sich ferner Quersugrisse im Zinkengrund und an der Zinkenspitze des nativem Nadelholzes.

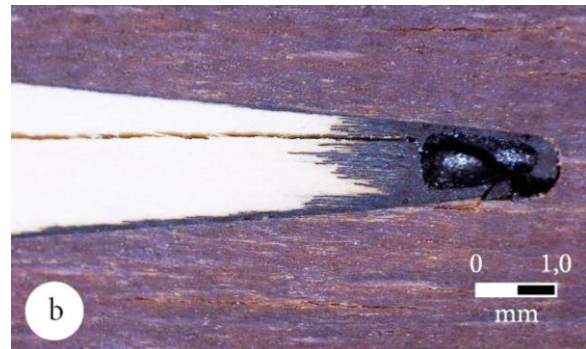
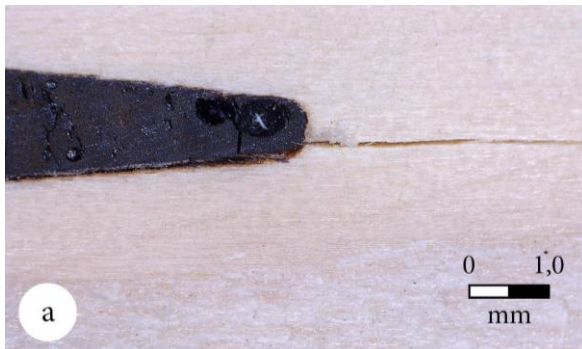


Abbildung 123: Aufnahmen des Zinkengrundes (a) und der Zinkenspitze (b) von nativem Nadelholz bei der Verklebung mit KP

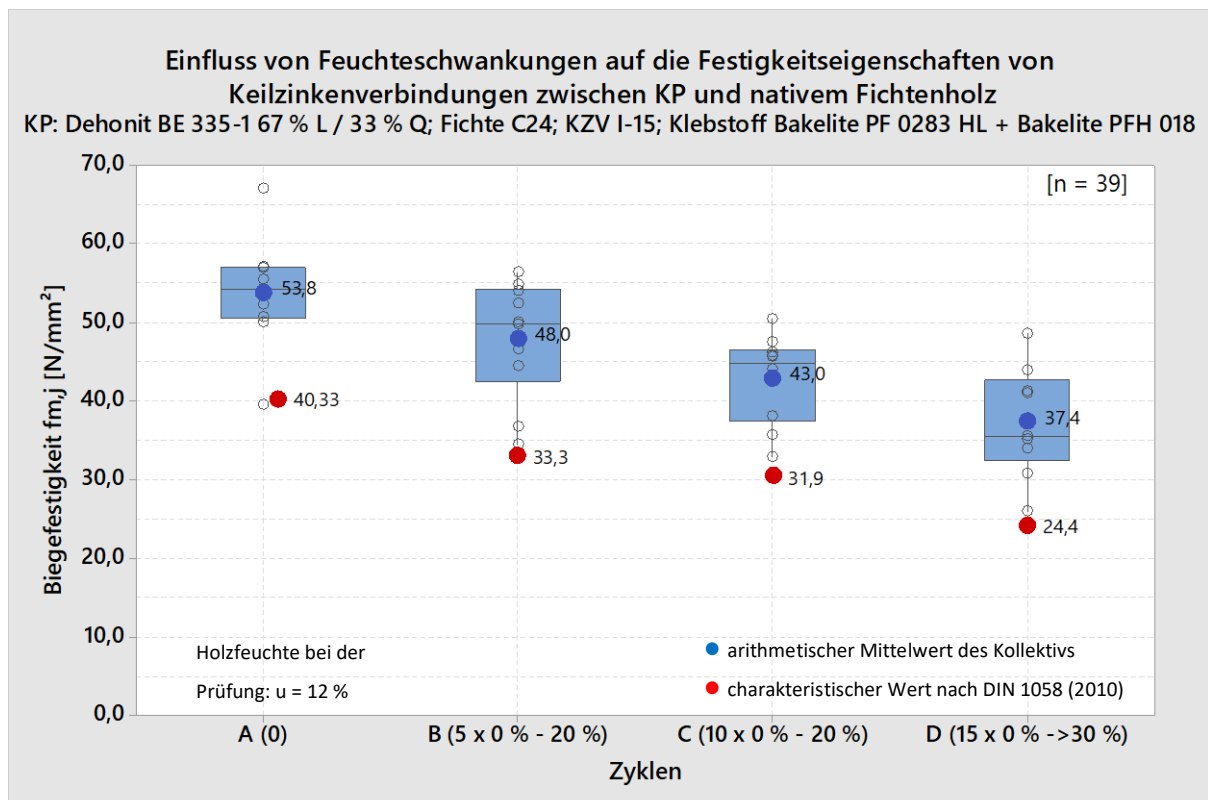


Abbildung 124: Auswirkung zyklischer Holzfeuchteveränderungen auf die Keilzinkenfestigkeit zwischen KP und Fichte

Mit steigender Anzahl der Belastungszyklen zeichnete sich eine Abnahme der Keilzinkenbiegefestigkeit keilgezinkter Querschnitte aus Fichte und KP gegenüber den Referenzprüfkörpern (Charge A) ab (vgl. Abbildung 124, S. 119). Das Risswachstum aufgrund von Schwindbeanspruchungen ist demnach als fortschreitend zu bewerten.

Bewertung der Versuchsdurchführung

Um in einem begrenzten Zeitrahmen von 6 Monaten möglichst viele Feuchtezyklen dokumentieren zu können, wurde die Holz Trocknung im Trockenschrank bei 103 °C stark forciert. Bei Temperaturen über 100 °C geht freies Zellwasser in Dampf über, dabei kommt es zu einer Volumenvergrößerung $V_{\text{Dampf}} / V_{\text{Wasser}}$ von ca. 1.700.00 %.

mit:

$$V_{\text{Wasser}} = 0,001 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{Dampf}} = \frac{m}{M} \times R \times T / p = \frac{1}{0,018015 [\text{kg}/\text{Mol}]} \times 8,314 [\text{J}/\text{Mol}/\text{K}] \times 373,15 \text{ K} \times \frac{1}{101.300 \text{ Pa}} = 1,7 \text{ m}^3$$

V Volumen [m^3]

m Masse [kg] ➤ hier 1 kg = 0,001 $\text{m}^3_{\text{H}_2\text{O}}$ = 1 Liter

T Temperatur [K] = 373,15 K

M Molekulargewicht [kg/Mol] ➤ für Wasser ist $M = 0,018015 \text{ kg}/\text{Mol}$

R universelle Gaskonstante [J/Mol/K] = 8,314 [J/Mol/K]

P Druck [pa] Normaldruck = 101.300 Pa

Die Belastungen auf die Holzzellen und die Klebfugen sind dabei um ein Vielfaches größer als sie bei einer natürlichen Freilufttrocknung wären.

Jahreszeitbedingte Holzfeuchtespreizungen von Hölzern in der Nutzungsklasse 1 von mehr als 10 % sind unüblich. Selbst bei Holzträgern in der Nutzungsklasse 2 stellt sich eine Holzfeuchtespreizung von 10 % nur in oberflächennahen Bereichen des Holzquerschnitts ein, während im Trägerinneren eine über den Jahresverlauf nahezu stationäre Holzfeuchte vorliegt (vgl. Kap. 3.1).

Aus den genannten Gründen sind die Erkenntnisse, die mit der beschriebenen Versuchsdurchführung gewonnen wurden, nur schwer auf die baupraktische Anwendung übertragbar. Jedoch lässt sich aufgrund der Vergleichsuntersuchungen an Keilzinkenverbindungen in Querschnitten aus Buchenholz (vgl. Abbildung 109, S. 109 und Abbildung 110, S. 110) ableiten, dass es bei Keilzinkenverbindungen zwischen nativer Fichte und KP wichtig ist, das Schwinden der nativen Fichte zu begrenzen. Dies kann im Wesentlichen durch 5 verschiedene Möglichkeiten geschehen:

- 1) Schaffung eines konstanten Raumklimas und damit einer konstanten Holzausgleichsfeuchte durch entsprechende Gebäudeklimatechnik. Als Beispiel können ganzjährig genutzte Schwimm-, Eis- und Sporthallen aufgeführt werden.
- 2) Trocknung des nativen Holzes vor dem Verkleben auf die geringste zu erwartende Holzfeuchte während der baulichen Nutzung. Dadurch wird gewährleistet, dass keine Schwindspannungen auf die Klebfuge hervorgerufen werden. Für den Einsatz in landwirtschaftlich genutzten Hallen

genügt dann eine Trocknung des Holzes vor der Verklebung auf eine Holzfeuchte von ca. 15 %. Für den Einsatz in Sport- oder Produktionshallen sollte das Holz vor der Verklebung auf eine Holzfeuchte von ca. 10 % getrocknet werden.

- 3) Verlangsamung oder Behinderung des Feuchteaustausches zwischen Luft und der Holzoberfläche durch Erhöhung des Wasserdampfdiffusionswiderstands der Holzoberfläche. Eingesetzt könnten unter anderem Öle, Wachse, Alkydharze oder 2K-Polyurethanlacke werden. Bei 2K-Polyurethanlacken, wie sie beispielsweise bei der Versiegelung von Parkettböden eingesetzt werden, kann der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Holzoberfläche um ca. das 40-fache (Loba, 2018, S. 1) gesteigert und damit ein Feuchteausaustausch aufgrund jahreszeitlicher Luftfeuchteschwankungen nahezu gänzlich unterbunden werden.
- 4) Veränderung des Quellverhaltens der Zellwand durch chemische oder thermische Modifikation der Hölzer.
- 5) Stärkere Pressdrücke beim Verkleben der Keilzinken und damit Druckvorspannung quer zur Faserrichtung ³⁹.

Begrenzung der Schwindverformung

Bei der Herstellung einer Keilzinkenverbindung des Typs I-15 in Nadelholz wird ein Pressdruck von 10 N/mm² aufgebracht (vgl. Abbildung 86, S. 88), was zu einer elastischen ggf. auch plastischen Stauchung der Zinkenspitzen quer zur Zinkenachse führt. Diese elastische Vorspannung quer zur Holzfaser wird unter einer Zugkraft auf die Keilzinkenverbindung abgebaut. Bei Nadelholz der Festigkeitsklasse C24 liegt der Bemessungswert der Zugfestigkeit ohne Beachtung des k_{mod} -Wertes bei $f_d = f_k / \lambda_M = 14 \text{ N/mm}^2 / 1,3 = 10,8 \text{ N/mm}^2$. Die Stauchung der Keilzinken durch den bei der Herstellung aufgetragenen Pressdruck und die Dehnung infolge einer Zugbeanspruchung heben sich somit in etwa auf. Für die Ermittlung des zulässigen Schwindmaßes können Querspannungen - aufgrund mechanischer Belastung - demnach außer Acht gelassen werden.

Um das Reißen des Holzes zu verhindern, dürfen die Schwindspannungen in radialer als auch in tangentialer Richtung die Holzfestigkeiten in radialer und in tangentialer Richtung nicht überschreiten. Das Schwinden beträgt für Fichte und Kiefer nach Halász & Scheer (1996), zitiert in Niemz & Sonderegger (2017, S. 101)

in Radialrichtung: 0,19 % / [1 % u]

und in Tangentialrichtung: 0,36 % / [1 % u].

Mit $\sigma_L = E_L \times x \text{ [\%u]} \times e_{\text{schwind}}$

lässt sich eine zulässige Holzfeuchteänderung berechnen mit:

$$x \text{ [\%u]} = \frac{\sigma_L}{E_L \times e_{\text{schwind}}}$$

³⁹ Anmerkung: eine Steigerung des Pressdruckes ist nur bedingt möglich, da bei zu hohen Pressdrücken der Klebstoff aus der Klebfuge gepresst wird und die Leistungsfähigkeit der Klebung dadurch sinkt (vgl. Abbildung 87, S. 89 und Abbildung 88, S. 90). Darüberhinaus bauen sich Vorspanneffekte in Holz durch Relaxation in Teilen wieder ab (vgl. Abbildung 125, S. 122).

Mit $\sigma_{\perp radial} = 2,8 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{\perp tangential} = 2,2 \text{ N/mm}^2$
 und $E_{\perp radial} = 623 \text{ N/mm}^2$, $E_{\perp tangential} = 367 \text{ N/mm}^2$ ⁴⁰

beträgt die maximal zulässige Abnahme der Holzfeuchte nach dem Kleben in:

Radialrichtung: $u = \frac{2,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{623 \times 0,19 \%} = 2,4 \%$

und in Tangentialrichtung: $u = \frac{2,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{367 \times 0,36 \%} = 1,6 \%$

Zu beachten ist, dass durch Relaxationsprozesse Schwindspannungen im Holz abgebaut werden. Der Spannungsabbau hängt nach Perkitny & Hoffmann (1974) stark von der Dauer der Belastung sowie der Holzfeuchte ab (vgl. Abbildung 125). An unter einer Biegebeanspruchung gelagerten Prüfkörpern aus Kiefernspiltholz ($b = 10 \text{ mm}$, $h = 10 \text{ mm}$ und $l = 150 \text{ mm}$) konnten Perkitny & Hoffmann eine Spannungsrelaxation von bis zu 80 % festhalten.

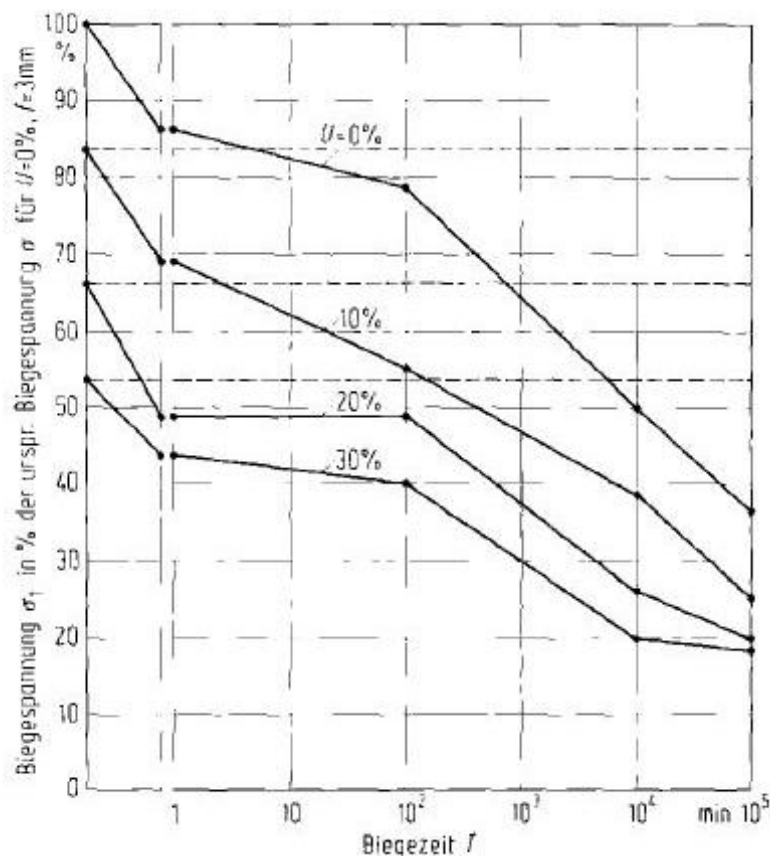


Abbildung 125: Spannungsrelaxation bei Kiefernspiltholz

Nach Dietsch (2014, S. 17) liegt der Schubspannungsabbau zwischen 40 % und 70 %. Nach Toratti & Svensson (2000) liegt die Spannungsrelaxation quer zur Faser bei einer Holz Trocknung und unter einer Querkzugbeanspruchung bei ca. 50 %. Nach Niemz & Sonderegger (2017, S. 117) ist die Spannungsrelaxation bei langsamer Trocknung größer als bei schneller Trocknung.

⁴⁰ nach Tabelle 30, im Anhang, S. A-2

Legt man beim Trocknen quer zur Faser einen Spannungsabbau von 50 % zugrunde, liegt die maximale zulässige Holzfeuchteänderung bis zum Querkzugversagen des Holzes infolge blockiertem Schwinden:

in Tangentialrichtung bei 3,2 %

und in Radialrichtung bei 4,8 %.

Geht man davon aus, dass für eine Halle in der Nutzungsklasse 1 eine minimale Holzfeuchte von $u \sim 5$ % im oberflächennahen Bereich (vgl. Kap. 3.1) erreicht werden kann, dann darf das native Nadelholz bei der Verklebung eine maximale Holzfeuchte von $u = 8$ % nicht überschreiten. Für den Einsatz in Nutzungsklasse 2 muss mit einer Trocknung der Holzfeuchte von 10 % gerechnet werden, damit darf das native Nadelholz bei der Verklebung eine maximale Holzfeuchte von $u = 13$ % nicht überschreiten.

Nach DIN EN 15497 (2014, S. 42) muss beim Klebvorgang „...der Holzfeuchtegehalt in jedem Stück Bauholz zwischen 7 % bis zu 18 % liegen.“ Dies entspricht einem Holzfeuchtebereich von $u = 8$ % bis $u = 22$ %. Aufgrund des hohen Energiebedarfs bei der technischen Holz Trocknung ist es jedoch wirtschaftlicher, die Hölzer am oberen zulässigen Ende des Holzfeuchtespektrums zu verkleben. Um dennoch Holzfeuchten von 8 % unter vertretbarem Energieeinsatz zu erreichen beschreiben Glos & Fuchs (1987, S. 24) verschiedene Varianten lokaler Trocknung, die die Holzfeuchte im Bereich der Klebstelle senken können. Mit einer partiellen Heißlufttrocknung oder Infrarottrocknung lässt sich beispielsweise die Holzfeuchte je nach Ausgangsfeuchte der Kanthölzer, der Trocknungsdauer und des Energiebedarfs im Bereich der Klebstelle auf bis zu $u = 3$ % senken. Glos & Fuchs (1987, S. 24)

4.2.7 Dämpfung des hygroskopischen Verhaltens durch Oberflächenanstriche ⁴¹

Um die Reaktion von Holz (Schwinden und Quellen) auf Veränderungen der Luftfeuchtigkeit zu minimieren wurden zwei unterschiedliche Oberflächenanstriche auf Fichtenholzprüfkörper (Tabelle 13) aufgebracht und deren Dämpfungseigenschaften auf die Feuchteaufnahme und die Feuchteabgabe dokumentiert.

Tabelle 13: Behandlung der Prüfkörper

	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Prüfkörper 3	Prüfkörper 4	Prüfkörper 5
A: $p = 0,384 \text{ g/cm}^3$	kein Anstrich	1 x Anstrich 1 ⁴²	3 x Anstrich 1	1 x Anstrich 2 ⁴³	2 x Anstrich 2
B: $p = 0,428 \text{ g/cm}^3$	kein Anstrich	1 x Anstrich 1	3 x Anstrich 1	1 x Anstrich 2	2 x Anstrich 2

Die aus den Versuchsdaten abgeleiteten Sorptionskurven (vgl. Kap. A-3.1.2, Abbildung 220, S. A-15) zeigen allesamt einen ähnlichen Verlauf. Bei Lagerung im Feuchtklima ⁴⁴ fällt mit zunehmender Lagerungsdauer die Kurvensteigung und damit die Adsorptionsgeschwindigkeit, bis sie beim Erreichen der Holzgleichsfeuchte gleich 0 ist. Bei Lagerung im Trockenklima ⁴⁵ ist zu Beginn der Trocknung die Desorptionsgeschwindigkeit ebenfalls am größten, bis sie beim Erreichen der Holzgleichsfeuchte erneut gleich 0 ist.

⁴¹ vgl. Prüfungen in Anhang, Kap. A-3.1.2, S. A-14

⁴² Produkt: Steinert® Drechsleröl

⁴³ Produkt: Remmers HWS 112 Hartwachs-Siegel

⁴⁴ hier: 20 °C, 90 % RH

⁴⁵ hier: 20 °C, 30 % RH

4.2.7.1 Theoretischer Hintergrund

Dieses charakteristische Adsorptions- und Desorptionsverhalten lässt sich mit Hilfe des ersten Fickschen Diffusionsgesetzes (vgl. Fick, 1855) erklären:

$$v_D = -D \times \frac{\Delta_c}{\Delta_x}$$

Die Diffusionsgeschwindigkeit v_D hängt vom Konzentrationsunterschied Δ_c , der Diffusionskonstanten $-D$ und der zu überwindenden Strecke Δ_x ab. Mit abnehmendem Wasserdampfkonzentrationsunterschied Δ_c nimmt demnach auch die Diffusionsgeschwindigkeit v_D ab.

Durch das Aufbringen der im Versuch verwendeten Anstriche wird die Diffusionskonstante D verringert, was sich durch eine Verringerung der Kurvensteigung und damit einer geringeren Diffusionsgeschwindigkeit v_D widerspiegelt. Einer Verringerung der Diffusionskonstanten wirkt sich nach dem ersten Fickschen Diffusionsgesetzes insbesondere bei einem großen Wasserdampfkonzentrationsunterschied Δ_c auf die Diffusionsgeschwindigkeit aus.

4.2.7.2 Bewertung der eingesetzten Anstriche

Im Versuch bestätigte sich, dass sich mit den beiden eingesetzten Produkten sowohl eine Verlangsamung der Wasseraufnahme als auch eine Verlangsamung der Wasserabgabe erzielen lässt. Während ein einziger Auftrag zu einer vergleichsweise geringen Reduktion der Adsorptionsgeschwindigkeit bzw. der Desorptionsgeschwindigkeit führte, konnte mit einem mehrmaligen Auftrag beider Produkte eine deutliche Verlangsamung der Adsorption und Desorption erzielt werden. Unter Lagerung im Feuchtklima wiesen beide Anstriche annähernd gleiche Dämpfungseigenschaften auf, bei der Lagerung im Trockenklima waren die Dämpfungseigenschaften des Produktes 1 besser als die des Produktes 2.

In Abbildung 126, S. 125 ist als Mittelwert aus jeweils zwei Prüfkörpern das Adsorptions- und das Desorptionsverhalten von unbehandelten (grüne Kurve) und mit Produkt 1 (dreifach behandelten) Holzquerschnitten (blaue Kurve) dargestellt. Es zeigte sich, dass sich durch den Anstrich eine deutliche Verlangsamung der Wasseraufnahme und der Wasserabgabe, insbesondere bei kurzen und starken Veränderung der klimatischen Bedingungen, erzielen lässt. Die Holzausgleichsfeuchte war bei den Prüfkörpern mit Anstrich identisch mit der Holzausgleichsfeuchte der unbehandelten Prüfkörper (vgl. Abbildung 126, Zeitpunkt $t = 42$ Tage).

Befeuchtung

Bezogen auf eine Referenzfeuchte von $u = 11,8 \%$ (Normalklima) und einer Zielfeuchte von $u = 20,5 \%$ (Feuchtklima) vergrößert sich die Zeitdauer bis zum Erreichen einer Holzfeuchte von:

- 16,1 % (was einer Feuchteaufnahme von 50 % der Gesamtaufnahmemenge entspricht) um ca. das 3,5-fache,
- 18,3 % (was einer Feuchteaufnahme von 75 % der Gesamtaufnahmemenge entspricht) um ca. das 2,6-fache,
- 19,5 % (was einer Feuchteaufnahme von 90 % der Gesamtaufnahmemenge entspricht) um ca. das 2,2-fache.

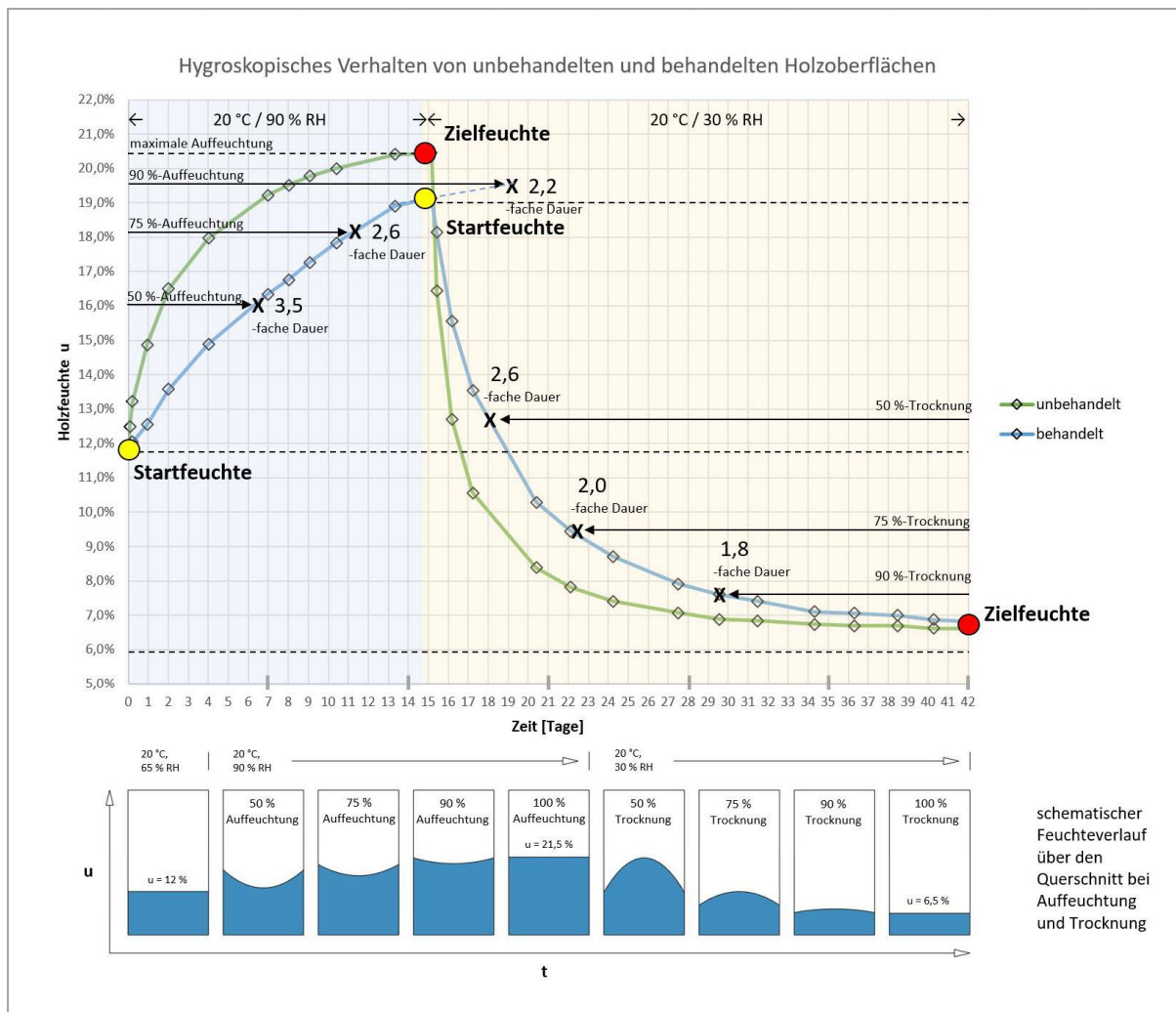


Abbildung 126: Hygroskopisches Verhalten von unbehandelten und behandelten Holzoberflächen

Trocknung

Bezogen auf eine Referenzfeuchte von $u = 19,0\%$ und einer Zielfeuchte von $u = 6,5\%$, vergrößert sich die Zeitdauer bis zum Erreichen einer Holzfeuchte von:

- $12,75\%$ (was einer Feuchteabnahme von 50% der Gesamtabnahmemenge entspricht) um ca. das 2,6-fache,
- $9,6\%$ (was einer Feuchteabnahme von 75% der Gesamtabnahmemenge entspricht) um ca. das 2,0-fache,
- $7,8\%$ (was einer Feuchteabnahme von 90% der Gesamtabnahmemenge entspricht) um ca. das 1,8-fache.

4.2.7.3 Baupraktische Anwendung

Die Holzausgleichsfeuchte wird primär durch die Temperatur und die Luftfeuchte sowie durch die Holzart beeinflusst (vgl. Kap. 3.3.1). Die Holzfeuchte zum Zeitpunkt t hängt ferner ab von der Holzfeuchte zum Zeitpunkt t_0 (Bezugspunkt), vom Wasserdampfdruck, von den Querschnittsabmessungen, von der Holzdichte ρ (Schaffrath, 2015), von der Faserorientierung (Niemz & Sonderegger 2017),

sowie von der Oberflächenbeschaffenheit. In Nutzungsklasse 1 sind die Schwankungen von Temperatur und Luftfeuchte durch die Gebäudehülle begrenzt. Tageszeitliche Schwankungen (Kurzzeitschwankungen) im Außenbereich wirken sich nur geringfügig auf das Innenraumklima und damit auf die Holzgleichsfeuchte aus. Jahreszeitliche Veränderungen der Außentemperaturen und eine damit verbundene Beheizung der Innenräume können jedoch zu einer starken Beeinflussung des Innenraumklimas, insbesondere der Luftfeuchte, führen (Langzeitschwankungen) ⁴⁶.

In Nutzungsklasse 2 wirken sich neben den jahreszeitlichen klimatischen Schwankungen auch tageszeitliche Veränderungen der Lufttemperatur und der Luftfeuchte auf die Holzgleichsfeuchte aus.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden an einer gen Norden orientierten Holzfassade tageszeitliche Veränderungen der Außentemperatur und der Luftfeuchte erfasst, um daraus Schwankungen der Holzgleichsfeuchte im Tagesverlauf zu berechnen (vgl. Abbildung 127). Die Daten wurden mit einem Datenlogger (Modell Voltcraft, DL-141TH2K) in 1,3 m Höhe über Boden festgehalten. Über die Temperatur und Luftfeuchte wurde mit Hilfe der in Abbildung 24, S. 29 aufgeführten Tabelle die Holzgleichsfeuchte abgeleitet. Die Messungen fanden im Zeitraum von 29.06.2019 bis 02.07.2019 statt.

Aufgrund der verhältnismäßig großen Temperatur- und Luftfeuchteunterschiede im Untersuchungszeitraum variiert die Holzgleichsfeuchte im Tagesverlauf mit $u = 9 \%$ stark. Bedingt durch die schnelle und hohe Schwankung der Holzgleichsfeuchte in Nutzungsklasse 2, hat das Aufbringen von Oberflächenanstrichen einen stärkeren Effekt auf Holzquerschnitte im Außenbereich als auf Holzquerschnitte im Innenbereich (Nutzungsklasse 1).

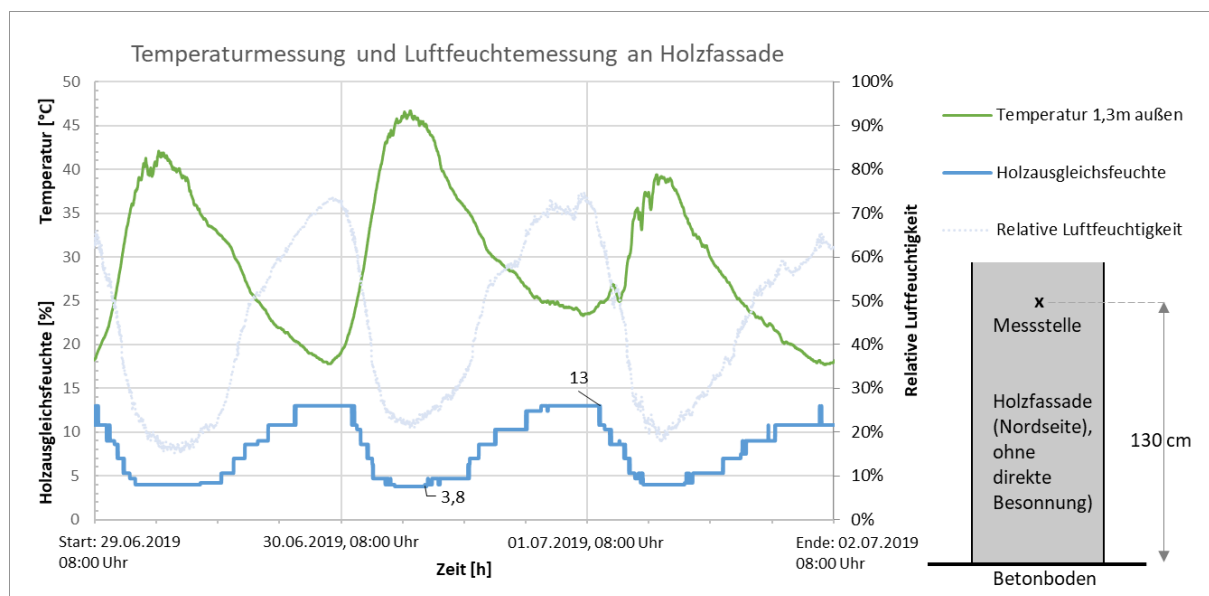


Abbildung 127: Temperatur und Luftfeuchte an einer Richtung Norden orientierten Holzfassade

4.2.7.4 Holzfeuchteverteilung

Nach Fortuin (2003, S. 168) kann bei der Holz Trocknung von einer parabelförmigen Feuchteverteilung im Holzquerschnitt ausgegangen werden (vgl. Abbildung 126, unten rechts). Der parabelförmige Verlauf kann durch das erste Ficksche Diffusionsgesetz erklärt werden. In der Grenzfläche zwischen Luft

⁴⁶ vgl. Nutzungsklassen in Kap.3.1, S. 26 ff.

und Holzoberfläche ist bei Beginn der Trocknung der Konzentrationsunterschied Δ_c von Wasserdampf im Holzlumen und der Umgebungsluft am größten. Mit der Trocknung der Oberfläche stellt sich ein Feuchtegefälle von der Holzoberfläche zum Zentrum des Holzquerschnitts ein. Der Wasserdampfkonzentrationunterschied Δ_c nimmt von der Oberfläche bis zum Zentrum kontinuierlich ab, damit sinkt die Diffusionsgeschwindigkeit v_D ebenfalls von der Oberfläche bis zum Zentrum. Bei der Auffeuchtung stellt sich ebenfalls ein parabelförmiger Verlauf der Holzfeuchte über den Querschnitt ein (vgl. Abbildung 25, S. 30).

Die Holzausgleichsfeuchte ist nur dann konstant über den gesamten Holzquerschnitt verteilt, wenn der Holzquerschnitt unter gleichbleibenden klimatischen Randbedingungen und ausreichend lange gelagert wird (vgl. Abbildung 126, schematischer Feuchteverlauf unten). In der Praxis führen die stetigen Luftfeuchteschwankungen und Temperaturschwankungen jedoch immer zu Holzfeuchtegradienten über den Holzquerschnitt.

4.2.7.5 Modell zur Übertragung der Erkenntnisse auf reale Bauwerke

Im nachfolgenden Beispiel wird der Dämpfungseffekt des Anstrichs 1 auf das Sorptionsverhalten eines Holzträgers in der Eishalle Buchloe übertragen. Hierzu wird auf das Datenmaterial aus Gamper et al. (2012, S. A48 ff.) für die Langzeit-Holzfeuchte-Messung (Messstelle 1) zurückgegriffen. Bei der Eissporthalle handelt es sich um eine Halle, die keiner spezifischen Nutzungsklasse zugeordnet werden kann.

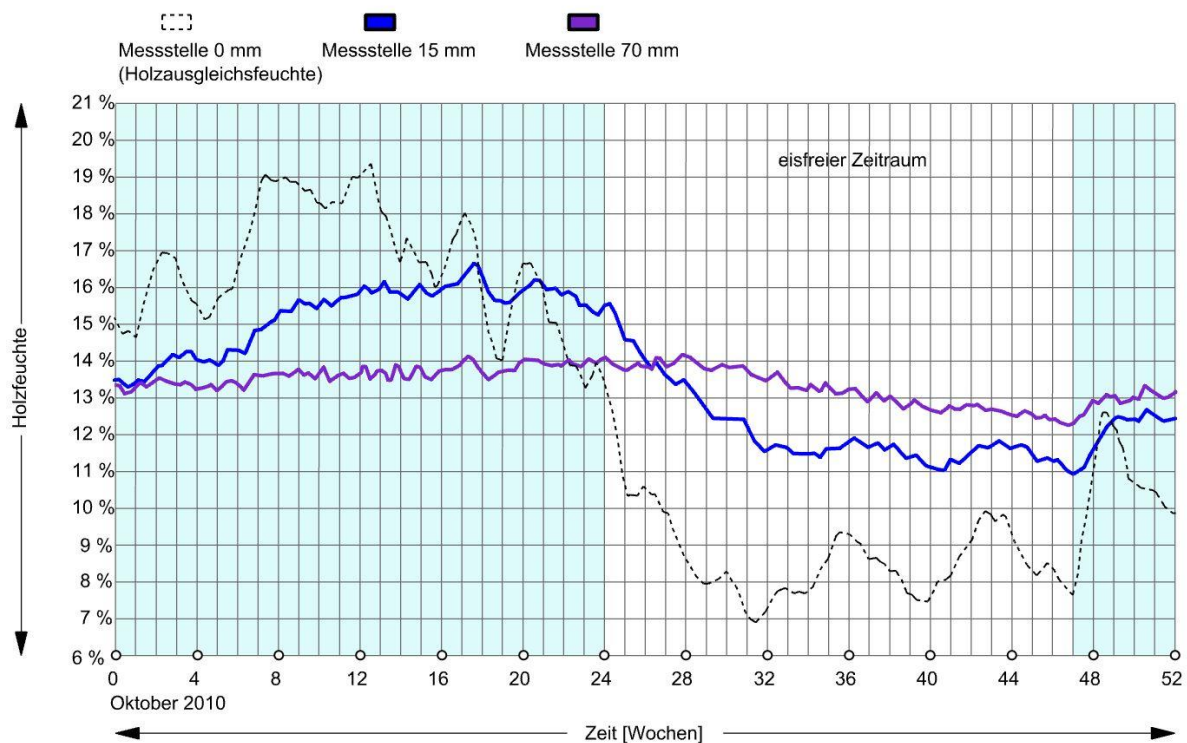


Abbildung 128: Verlauf der Holzfeuchte in der Eissporthalle Buchloe

In der Halle bilden sich zwei extreme klimatische Situationen aus: Von September bis März wird die Halle gekühlt, sodass die Ausbildung einer Eisfläche ermöglicht werden kann; in diesem Zeitraum liegt die Temperatur relativ gleichförmig zwischen 0 °C und 5 °C und die relative Luftfeuchte zwischen 75 % und 85 %. Ab März bis September findet keine Kühlung statt. Die Temperaturen steigen in diesem

Zeitraum auf 15 °C bis 25 °C, die relative Luftfeuchte fällt auf 35 % bis 45 %. Während der Spielsaison liegt die Holzausgleichsfeuchte bei ca. 18 %, im eisfreien Zeitraum bei ca. 8 %. Der Mittelwert der Holzfeuchte beträgt ca. 13,4 %.

Abbildung 128, S. 127 zeigt die Verteilung der Holzfeuchte in 15 mm Tiefe (blaue Kurve) und in 70 mm Tiefe (lila Kurve) eines 180 mm breiten Trägers. Darüber hinaus wird die Holzausgleichsfeuchte auf der Bauteiloberfläche, die sich aus der entsprechenden Kombination aus Temperatur und Luftfeuchte ermitteln lässt, als gestrichelte Kurve dargestellt. Die Kurve entspricht dem gleitenden Durchschnitt über 10 Tage. Die Schwankung der Holzausgleichsfeuchte beträgt im Jahresverlauf ca. $u = 11,4$ %. Die maximale Holzausgleichsfeuchte wird im Januar mit ca. 19,4 %, die minimale Holzausgleichsfeuchte im September mit ca. 8 %, erreicht. Mit zunehmender Messtiefe nehmen die jahreszeitlichen Schwankungen der Holzfeuchte ab. In 15 mm Tiefe beträgt die Schwankung der Holzfeuchte im Jahresverlauf etwa 5,5 %, im Zentrum des Trägers etwa 2 %.

4.2.7.5.1 Annahmen

- 1) Die Erkenntnisse an kleinmaßstäblichen Versuchen lassen sich auf Träger in realer Bauteilabmessung übertragen.
- 2) Die Anstriche haben eine dauerhafte hydrophobierende Wirkung.
- 3) Vereinfacht wird der Eissporthalle während der Nutzung ein konstantes Klima von 5 °C und 80 % relativer Luftfeuchtigkeit und außerhalb der Nutzung ein konstantes Klima von 20 °C und 40 % relativer Luftfeuchtigkeit zugrunde gelegt. Die Ergebnisse aus Abbildung 126 können dann näherungsweise übertragen werden.
- 4) Holzart und Holzdichte der Träger der Eissporthalle sind mit den Proben der Versuchsdurchführung zum hygroskopischen Verhalten vergleichbar.

4.2.7.5.2 Modell

Da die tatsächliche Oberflächenfeuchte in Gamper et al. (2012) nicht ermittelt wurde, sondern nur durch den Zusammenhang zwischen Holzfeuchte und Luftfeuchte / Temperatur abgeleitet wurde, wird zunächst eine Prognose für die Holzfeuchte in 15 mm Tiefe getroffen. In dieser Messtiefe betrug die höchste gemessene Holzfeuchte ca. 16,5 %, die niedrigste Holzfeuchte ca. 11 %.

Der Feuchteverlauf wird vereinfacht mit Hilfe von vier einzelnen Geraden (rot) dargestellt.

- | | |
|----------------------------|------------------------------------|
| - Intervall I - II) | Auffeuchtung von 13,0 % auf 16,5 % |
| - Intervall II - III) | Trocknung von 16,5 % auf 11,75 % |
| - Intervall III - IV) | Trocknung von 11,75 % auf 11,0 % |
| - Intervall IV - Messende) | Auffeuchtung von 11,0 % auf 13,0 % |

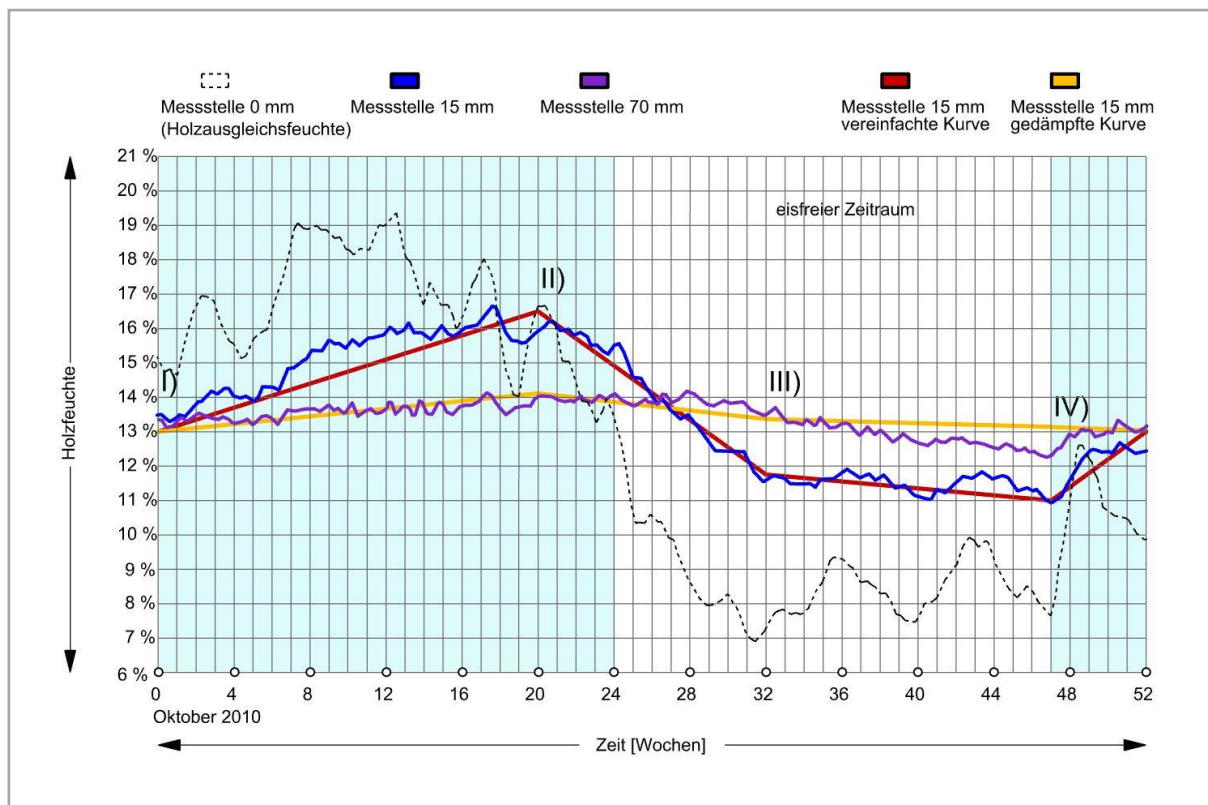


Abbildung 129: Modell zur Prognose der Holzfeuchte in der Eissporthalle Buchloe nach Einsatz von Oberflächenanstrichen

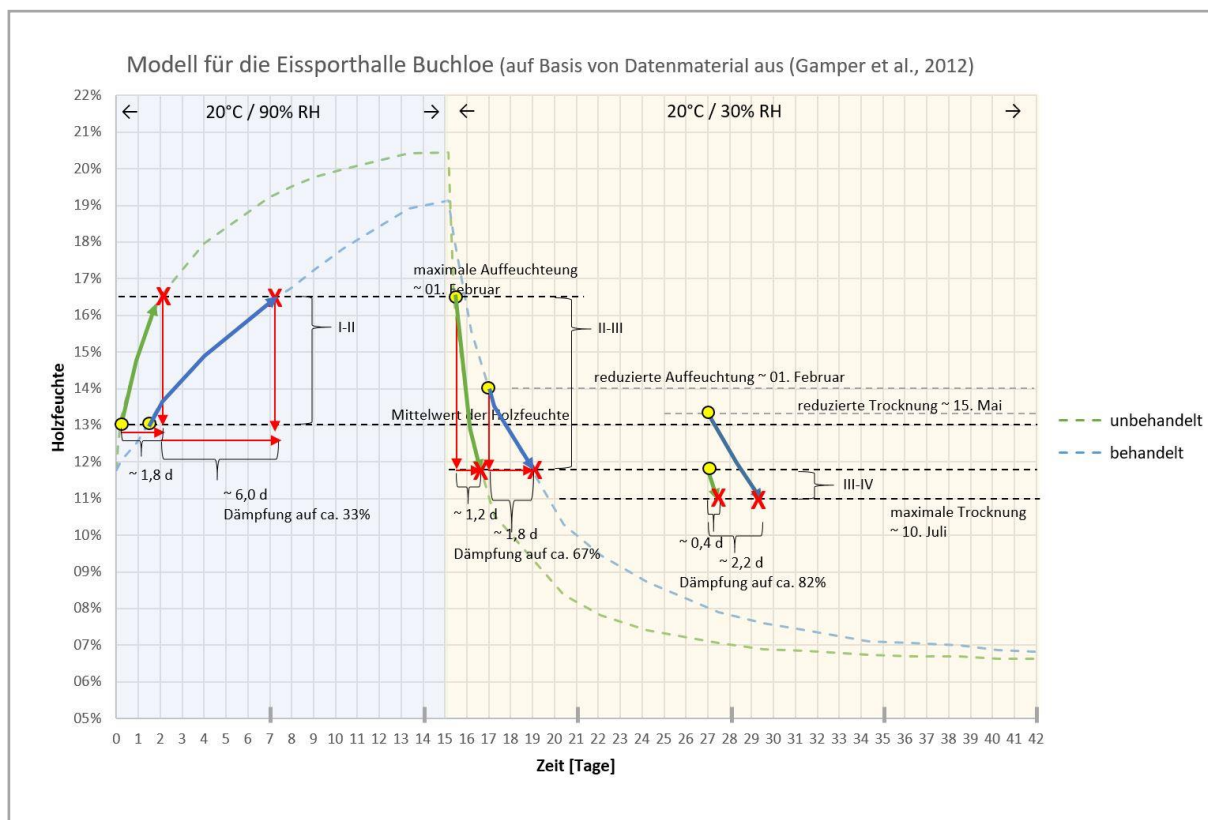


Abbildung 130: Modell für die Eissporthalle Buchloe, Dämpfungseffekt der Oberflächenanstriche

Intervall I - II

Versuch (vgl. Abbildung 130):

Die Auffeuchtung der im Feuchtklima gelagerten Prüfkörper von $u = 13,0\%$ auf $u = 16,5\%$ lag bei den unbehandelten Prüfkörpern nach ca. 1,8 Tagen und bei den mittels Produkt 1 behandelten Prüfkörpern nach ca. 6 Tagen vor. Die Adsorption wurde unter den oben genannten Randbedingungen auf ca. 33 % verlangsamt.

Modellübertragung (vgl. Abbildung 129):

Mit der orangefarbenen Kurve wird die Verlangsamung der Adsorption durch eine um 66 % reduzierte Steigung berücksichtigt. Die maximale Auffeuchtung beträgt unter Berücksichtigung einer verringerten Adsorptionsgeschwindigkeit dann bei (II) ca. $u = 14,1\%$.

Intervall II - III

Versuch (vgl. Abbildung 130):

Die Trocknung der im Trockenklima gelagerten Prüfkörper von $u = 16,5\%$ auf $u = 11,75\%$ lag bei den unbehandelten Prüfkörpern nach ca. 1,2 Tagen vor. Die Trocknung der mittels Produkt 1 behandelten Prüfkörper von $u = 14,1\%$ auf $u = 11,75\%$ lag nach ca. 1,8 Tagen vor. Die Desorption wurde demnach auf ca. 67 % verlangsamt.

Modellübertragung (vgl. Abbildung 129):

In Abbildung 127 wird mit der orangefarbenen Kurve die Verlangsamung der Adsorption durch eine um 33 % reduzierte Kurvensteigung berücksichtigt. Die maximale Trocknung beträgt unter Berücksichtigung einer verringerten Adsorptionsgeschwindigkeit bei (III) dann ca. $u = 13,3\%$.

Intervall III - VI

Versuch (vgl. Abbildung 130):

Die Trocknung der im Trockenklima gelagerten Prüfkörper von $u = 11,75\%$ auf $u = 11,0\%$ lag bei den unbehandelten Prüfkörpern nach ca. 0,4 Tagen vor. Die Trocknung der mittels Produkt 1 behandelten Prüfkörper von $u = 13,3\%$ auf $u = 11,75\%$ lag nach ca. 2,2 Tagen vor. Die Desorption wurde demnach auf ca. 18 % verlangsamt.

Modellübertragung (vgl. Abbildung 129):

Mit der orangefarbenen Kurve wird die Verlangsamung der Adsorption durch eine um 82 % reduzierte Steigung berücksichtigt. Die maximale Trocknung beträgt unter Berücksichtigung einer verringerten Adsorptionsgeschwindigkeit bei (III) dann ca. $u = 13,1\%$.

Intervall IV - Messende

Modellübertragung (vgl. Abbildung 129):

Die orangefarbene Kurve wird bis zum Messende auf den Ausgangswert der Holzfeuchte von $u = 13 \%$ fortgeführt.

Die abgeleitete gedämpfte Kurve (orange) zeigt eine deutlich geringere Schwankung der Holzfeuchte um den Mittelwert als die aus dem Datenmaterial vereinfacht abgeleitete Kurve (rot). Der Wechsel der Holzfeuchte beträgt im Jahresverlauf lediglich ca. $\pm 1 \%$. Legt man der Holzfeuchteverteilung einen parabelförmigen Verlauf zugrunde, dann kann damit eine Prognose für die Feuchte auf der Holzoberfläche getroffen werden (vgl. Abbildung 131).

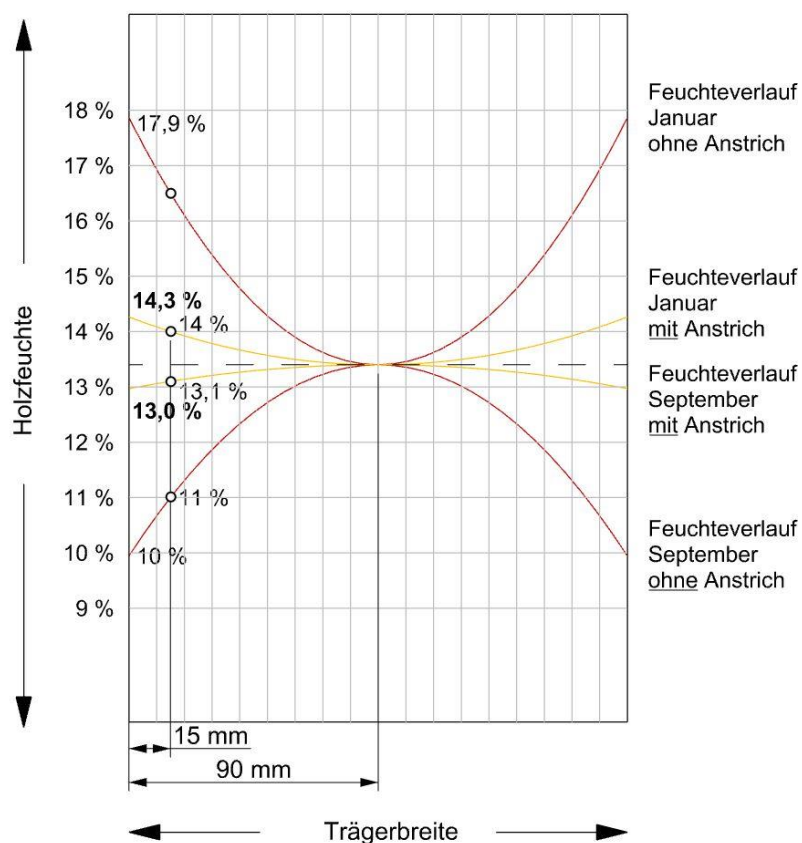


Abbildung 131: Feuchteverlauf über die Trägerquerschnittsfläche

In den Randbereichen stellt sich bei unbehandelter Oberfläche im Jahresverlauf eine Holzfeuchtespreizung von $u = 7,9 \%$ ($17,9 \%$ - 10%) ein. Durch das dreifache Aufbringen des Anstrichs Typ 1 kann die Spreizung auf $u = 1,4 \%$ ($14,4 \%$ - 13%) verringert werden.

4.2.8 Fazit zu Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP

Das Fräsen von Keilzinken in KP ist mit den für native Hölzer entwickelten Keilzinkenfräsern möglich. Aufgrund der vergleichsweise hohen Dichte und der vergleichsweise hohen Härte von KP gegenüber nativem Holz können beim Fräsen des Hochleistungsholzwerkstoffes jedoch nicht die üblichen Prozessparameter gewählt werden. Das Fräsen hat bei einer deutlich langsameren Vorschubgeschwindigkeit zu erfolgen. Darüber hinaus fällt die Standzeit der Fräswerkzeuge im Vergleich zur Bearbeitung von Weich- sowie Harthölzern geringer aus.

Im Delaminationsversuch konnte ein gutes Klebergebnis mit Phenolharzklebstoff erzielt werden. Als Pressdruck und Presszeit können die nach DIN EN 15497 (2014) empfohlenen Parameter herangezogen werden.

Die Keilzinkenfestigkeit zwischen Fichtenholz und KP steigt mit abnehmender Jahrringbreite und zunehmender Dichte der nativen Fichte. Schichtfehler als Furnierüberlappungen oder Furnierstöße im KP führen zu einem starken Abfall der Keilzinkenfestigkeit. Aus diesem Grund dürfen im Bereich der Keilzinkenverbindung keine Furnierstöße in Form von Furnierüberlappungen im KP auftreten.

Bei gleichbleibender Holzfeuchte sind Keilzinkenverbindungen zwischen Fichtenholz und KP leistungsfähiger als Keilzinkenverbindungen zwischen Fichtenholz und Fichtenholz. Sinkt jedoch die Holzfeuchte nach der Verklebung, dann nimmt mit abnehmender Holzfeuchte die Leistungsfähigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichtenholz und KP aufgrund des unterschiedlichen Schwind- und Quellverhaltens beider Materialien und der sich daraus ergebenden Querkzugspannung in den Zinkenspitzen des nativen Nadelholzes gegenüber Klebverbindungen zwischen Fichtenholz und Fichtenholz ab. Um eine sichere und dauerhafte Verklebung zwischen Fichtenholz und KP zu erreichen, muss gewährleistet werden, dass das Schwinden des nativen Holzes begrenzt wird. Dies kann sowohl durch eine technische Trocknung der Hölzer (lokal / global) vor der Keilzinkenverklebung auf die während der Nutzung zu erwartende mittlere Holzausgleichsfeuchte und durch die Applikation geeigneter Oberflächenanstriche sowie durch thermische oder chemische Modifikation des nativen Holzes als auch durch Klimatisierung der Umgebungsluft sichergestellt werden.

Nach DIN EN 301 (2018, S. 12) muss „Die Festigkeit der Keilzinkenverbindung [. . .] mindestens so groß wie die charakteristische Biegefestigkeit des nicht keilgezinkten Holzes sein.“

Für das Keilzinkenprofil I-15 wurde für die Verklebung von nativer Fichte und KP eine charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit von $43,53 \text{ N/mm}^2$ ⁴⁷ (Versuchsreihe 1, Charge A und Versuchsreihe 2, Charge A im Anhang, Kap. A-3.3.5, S. A-29) bestimmt; als charakteristische Zugfestigkeit ein Wert von $43,2 \text{ N/mm}^2$ ⁴⁸ (Reihe W1, Anhang, Kap. A-3.2.5, S. A-22). Aufgrund der ermittelten Zug- und Biegefestigkeiten können Keilzinkenverbindungen zwischen KP mit Bauholz bis Festigkeitsklasse C35 ohne Festigkeitseinbußen ausgeführt werden.

⁴⁷ Verklebung und Prüfung unter Normalklima

⁴⁸ Verklebung und Prüfung unter Normalklima

4.2.8.1 Vorschlag für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Holz und KP

Für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP eignet sich das I-15 Vorzugsprofil. Unter Einsatz eines zweischneidigen Fräswerkzeuges sollte die Drehzahl des Fräasers bei etwa 6750 U/min und der Materialvorschub relativ zur Frässpindel bei ca. 1,85 m/min liegen. Gute Klebergegebnisse können mit PRF-Klebstoffen, wie beispielsweise Bakelite PF 0283 HL + PFH 0183 H erzielt werden. Der Klebstoff ist flächig auf die Flanken beider Fügepartner aufzubringen; der Pressdruck sollte bei 10 N/mm² liegen und für mindestens zwei Sekunden aufrecht gehalten werden. Für die Verklebung von KP mit nativem Nadelholz darf die Holzfeuchte des Nadelholzes die zu erwartende mittlere Holzfeuchte während der Nutzungsdauer im Kern des Trägers nicht überschreiten. Um den Feuchteaustausch zwischen Luft und Holzoberfläche zu verringern, ist nach der Keilzinkenverklebung und dem Abbund der Systemelemente ein geeigneter hydrophobierender Oberflächenanstrich aufzubringen. Für den Einsatz in NKL 1 sollte die Holzfeuchte des nativen Holzes bei der Verklebung 10 % nicht überschreiten. Für den Einsatz in NKL 2 sollte die Holzfeuchte bei der Verklebung unter 15 % liegen.

Weil das Keilzinkenfräsen in KP im Vergleich zum Keilzinkenfräsen in Nadelholz deutlich langsamer zu erfolgen hat, macht es Sinn, die Keilzinken in Nadelholz und die Keilzinken in KP auf zwei unterschiedlichen Produktionsstraßen zu fräsen, die individuell auf die Bearbeitung der beiden Fügepartner optimiert werden können. Denkbar wäre das Keilzinkenfräsen der Stab- oder Lamellenenden bereits durch den Produzenten des KPs mit anschließender Lieferung der Rohlinge an den KVH- oder den Brett-schichtholzhersteller.

Anwendungsbeispiel und erforderliche Maßnahmen

Anwendung in Nutzungsklasse 1

- zu erwartende mittlere Holzfeuchte im Kernbereich: $u = 10\%$ → Holztrocknung auf $u = 10\%$
- zu erwartende minimale Holzfeuchte im Randbereich: $u = 5\%$

Bei der Trocknung der Holzoberfläche um 5 % ist mit einer Schädigung der Keilzinkenverbindung zu rechnen.

- erforderliche Maßnahmen zur Minimierung der Schwindspannungen in der Klebfuge:
z. B. Auftrag eines hydrophobierenden Oberflächenanstrichs
- Trocknung (lokal / global) des nativen Holzes auf eine Holzfeuchte von $u = 5\%$

Anwendung in Nutzungsklasse 2

- zu erwartende mittlere Holzfeuchte im Kernbereich: $u = 15\%$ → Holztrocknung auf $u = 15\%$
- zu erwartende minimale Holzfeuchte im Randbereich: $u = 10\%$

Bei der Trocknung der Holzoberfläche um 5 % ist mit einer Schädigung der Keilzinkenverbindung zu rechnen.

- erforderliche Maßnahmen zur Minimierung der Schwindspannungen in der Klebfuge:
z. B. Auftrag eines hydrophobierenden Oberflächenanstrichs
- Trocknung (lokal / global) des nativen Holzes auf eine Holzfeuchte von $u = 10\%$

5 Anschluss mit zylindrischen Verbindungsmitteln in KP

Das Ziel des verstärkten Anschlusses liegt einerseits darin, den Anschlussbereich dahingehend statisch zu optimieren, dass Querschnittsschwächung durch die Verbindungsmittel kompensiert werden und die volle Tragfähigkeit des nativen Bruttostabquerschnitts für die statische Nachweisführung angesetzt werden kann. Andererseits soll aber auch erreicht werden, dass die Stabverbindung reversibel, also zerstörungsfrei demontierbar ist, um so eine Wiederverwendung der Stäbe zu ermöglichen, was nur dann realisiert werden kann, wenn plastischen Verformungen der Verbindungsmittel durch entsprechende Dimensionierung ausgeschlossen werden können.

In Kapitel 5 wird zunächst der theoretische Hintergrund von Verbindungen mit zylindrischen Verbindungsmitteln zusammengefasst. Im Anschluss daran werden mechanische Kennwerte für das verstärkte Stabende an zahlreichen kleinmaßstäblichen Versuchen ermittelt, die dann an Querschnitten in realer Bauteilabmessungen verifiziert werden.

5.1 Spannungsverteilung um ein zylindrisches Verbindungsmittel

Werden Stabkräfte über zylindrische Verbindungsmittel aus einem Holzquerschnitt auf ein weiteres Element, wie ein Stahlblech oder einen Holzquerschnitt übertragen, so kommt es zu Spannungskonzentrationen an der Kontaktstelle zwischen dem Verbindungsmittel und der Bohrlochinnenwandung, der Lochleibung.

Die im ungeschwächten Querschnitt homogen verteilte Spannung konzentriert sich nahe dem Verbindungsmittel. Daraus resultiert eine ungleichmäßige Spannungsverteilung mit Spannungsspitzen im unmittelbarem Bereich der Lochleibung (vgl. Abbildung 10, S. 13). Die Stabkraft kann dabei ausschließlich als Druckkraft von der Lochleibung auf das Verbindungsmittel und umgekehrt vom Verbindungsmittel auf die Lochleibung übertragen werden. In einer zweidimensionalen Modellbetrachtung (vgl. Abbildung 132, S. 135) wird das Verbindungsmittel sowie die Bohrung jeweils durch einen Kreis beschrieben. Die Kreise haben im Idealfall den gleichen Durchmesser; somit liegen die Kreisoberflächen aneinander - idealisiert reibungsfrei - an. Wird der Stab auf Druck beansprucht, so wird die der Stabkraft zugewandte Kreisoberfläche (Vorderseite) der Lochleibung sowie des Verbindungsmittels bis auf Höhe des Kreisschwerpunkts auf Druck aktiviert.

Die auf Druck beanspruchte Lochleibungsfläche wird durch das Verbindungsmittel elastisch, ggf. auch plastisch gestaucht. Die der Stabkraft abgewandte Oberfläche (Rückseite) des Verbindungsmittels entfernt sich infolge der Dehnung mit Zunahme der Kraftgröße von der Lochleibungsfläche des Stabes. Auf der Rückseite des Bolzens besteht dann kein Kontakt mit der Lochleibung. Die Rückseite trägt bei einer Druckbeanspruchung im Stab demnach nicht zum Lastabtrag bei.

Herrscht im Stab eine Zugbeanspruchung, wird die Kraft zunächst um das Verbindungsmittel herumgeleitet und aktiviert die Rückseite des Verbindungsmittels. Daher sind grundsätzlich auf der Rückseite bei Zugbeanspruchung größere Randabstände zum Stabende einzuhalten als bei Druckbeanspruchung.

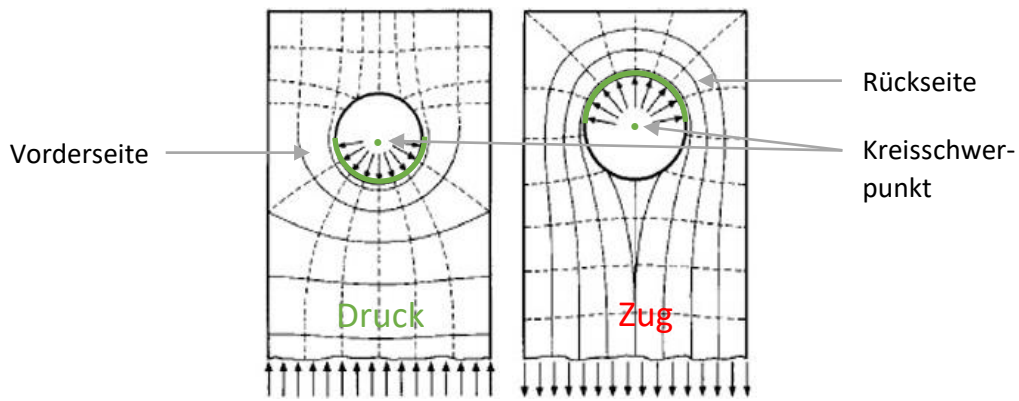


Abbildung 132: Spannungszustand im Holzteil in Abhängigkeit der Art der Krafteinleitung durch den Bolzen (Zug oder Druck): schematische Darstellung

Von Mises Spannungen um zylindrische Verbindungsmittel

Das linear-elastische FE-Modell (Abbildung 133) beschreibt die Situation eines 10 mm starken Stabdübels, der ohne Toleranz in eine Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm eines Nadelholzquerschnitts (C24) eingebracht wurde. Der Kontakt zwischen Verbindungsmittel ist idealisiert als reibungsfrei angenommen. Die gewählten Materialparameter für Nadelholz und Stahl sind im Anhang, Tabelle 30, S. A-2 aufgeführt. Die Randabstände a_3 und a_4 betragen jeweils $1,5 \times d$. Der Stahlbolzen (hellgraue Kreisfläche) ist in X-Richtung gehalten. Die Belastung q erfolgt ebenfalls in X-Richtung, linienförmig am Stabende im Abstand von $5 \times d$; im linken Bild auf Zug, im rechten Bild auf Druck.

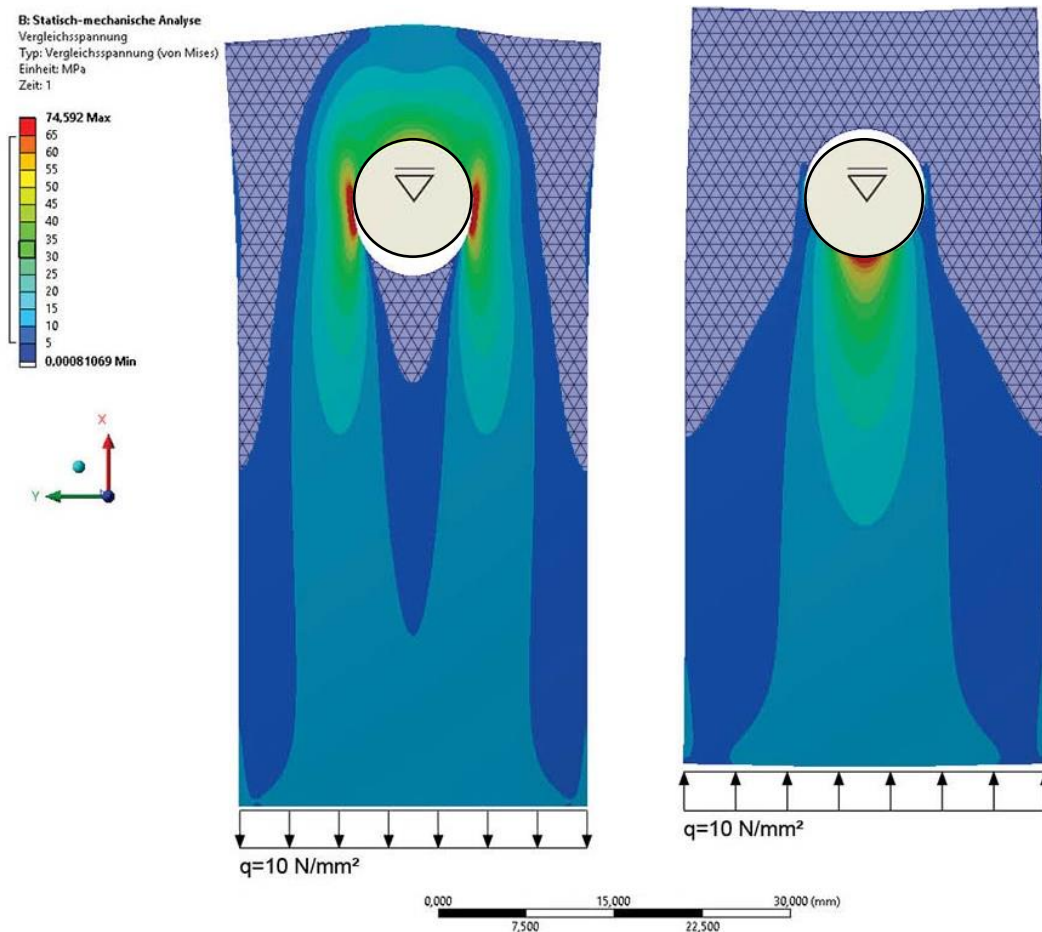


Abbildung 133: Vergleichsspannungen (von Mises) in einem Nadelholzquerschnitt im Bereich des zylindrischen Verbindungsmittels

Die schraffierten Bereiche stellen – in Abhängigkeit der Belastungssituation und der Stabverformung – weitgehend belastungsfreie Bereiche um das Verbindungsmittel dar. Außerhalb dieser Bereiche konzentrieren sich je nach Belastungsart die Spannungen in den gelb, orange und rot eingefärbten Zonen. Nahe am Verbindungsmittel bauen sich Spannungsspitzen auf, die die Spannung im ungeschwächten Querschnitt um ein Vielfaches übersteigen. Die Ursache liegt zum einen in der Querschnittsverjüngung infolge der Bohrung und damit in einer geometrischen Kerbwirkung (vgl. Kap. 5.2.1, S. 136 ff.) und zum anderen in der radialen Kraftverteilung in der Druckzone der Lochleibung (vgl. Kap. 5.2.2, S. 138 ff.).

5.2 Herleitung des Spannungszustandes

5.2.1 Modell zur Kerbwirkung gelochter Querschnitte (Spannungszustand I)

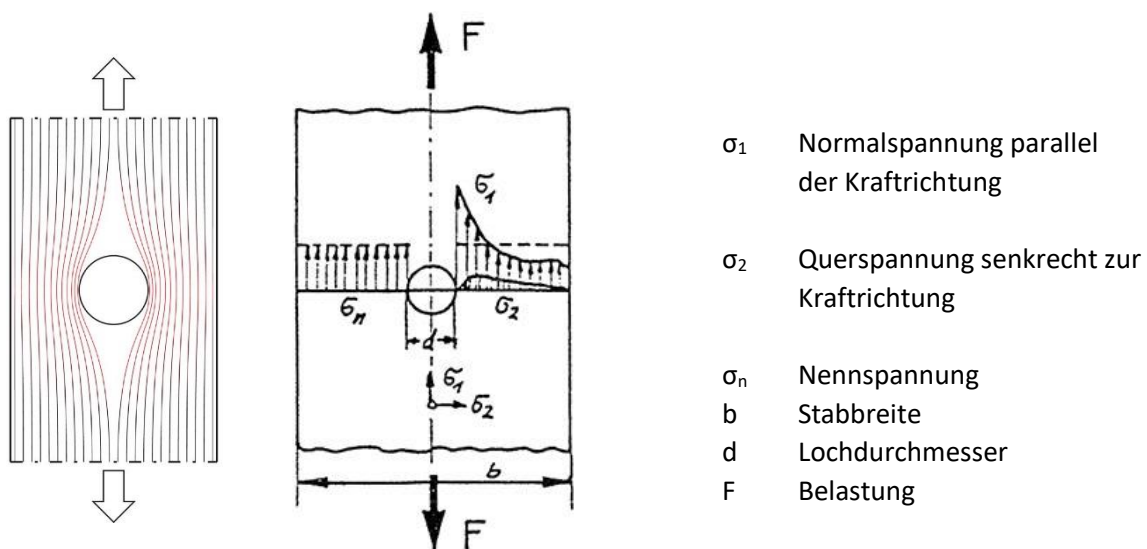


Abbildung 134: Links: Stromlinienanalogie: gestörter Kraftfluss / rechts: Spannungsverteilung in einem gelochten Zugstab

Abbildung 134 zeigt jeweils ein gelochtes Bauteil, das in ausreichend großem Abstand von der Bohrung auf Zug beansprucht wird. Im Bereich der Bohrung reduziert sich der zum Lastabtrag zur Verfügung stehende Querschnitt. Der von den Rändern ausgehende parallele Kraftfluss wird durch die Unstetigkeit im Querschnitt gestört. Im Bereich des Loches kommt es daher zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Spannung. Mittels der Stromlinienanalogie lässt sich die Auswirkung der Störung qualitativ darstellen (vgl. Abbildung 134, links). Eine Verdichtung der Stromlinien verdeutlicht qualitativ eine *Spannungsverdichtung* und damit einen Spannungsanstieg. Im Nettoquerschnitt steigen die Spannungen zum Kerbrand hin an (vgl. Abbildung 134, rechts, σ_1).

Darüber hinaus ruft eine Behinderung der elastischen Querverformung einen mehrachsigen Spannungszustand hervor. Neben der normal zur Krafrichtung wirkenden Längsspannung σ_1 bildet sich im Bereich des Nettoquerschnitts auch eine orthogonal zur Krafrichtung wirkende Spannung (Querspannung) σ_2 aus, die ebenfalls vom Bauteilrand zur Bohrung ansteigt. Die Höhe der Spannungsspitzen in die jeweiligen Koordinatenrichtungen hängt von der Belastungsgröße, dem Bohrdurchmesser, dem Material und der Querschnittsabmessung ab. (Buchmann, 1934)

Sie führen im Vergleich zu einem ungeschwächten Querschnitt zu einem vorzeitigen Bruch der Probe. Die Nennfestigkeit⁴⁹ des Nettoquerschnittes liegt dabei unter der Festigkeit des Bruttoquerschnitts.

Nach Gehri (1980) berechnet sich die Tragfähigkeit bei Holzteilen, die nur durch Bolzenlöcher geschwächt werden mit:

$$F_{zul} = \eta \times A_{netto} \times \sigma_{z||}$$

F_{zul}	Tragfähigkeit	A_{netto}	Nettoquerschnittsfläche
$\sigma_{z }$	Zugfestigkeit in Faserrichtung	η	Reduktionsfaktor mit $\eta = 0,8$ bis $0,9$

Ist der Querschnitt zwecks Aufnahme von Schlitzblechen geschwächt, so muss der Reduktionsfaktor von 0,8 angesetzt werden (Gehri, 1980).

Die Auswirkungen von Kerben auf die Trageigenschaft gelochter Querschnitte wird stark davon beeinflusst, ob der gelochte Querschnitt aus einem kerbempfindlichen oder kerbunempfindlichen Material besteht. Kerbunempfindliche Materialien - wie z. B. Stahl - zeigen ein duktilen Verhalten und damit im Spannungs-Dehnungs-Diagramm große plastische Verformungen bei der Überschreitung ihrer Streckgrenze. Das duktile Verhalten wirkt sich positiv auf das Tragverhalten an gelochten Querschnitten aus. Bei Eintritt des Materialfließens - also einer irreversiblen plastischen Querschnittsverformung - wird die lineare Beziehung aus Spannung und Dehnung (Hooke'sches Gesetz) außer Kraft gesetzt und es kommt zu einer lokal begrenzten Spannungsumlagerung, bei der die Spannungsspitze abgebaut wird. Bei duktilen Materialien liegt die Festigkeit des Nettoquerschnitts nahe der eigentlichen Materialfestigkeit.

Bei kerbempfindlichen Materialien mit vorwiegend sprödem Charakter, wie beispielsweise Holz oder KP unter einer Zugbelastung, kommt es unmittelbar vor Eintritt des Bruches zu keinen nennenswerten plastischen Verformungen. Die lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung bleibt - idealisiert - bis zum Bruch aufrecht. Folglich bauen sich bei spröden Werkstoffen Lochleibungsspannungsspitzen in nur geringem Umfang ab, sodass die Festigkeit im Bereich der Störstelle deutlich unterhalb der Materialfestigkeit liegt.

Die Kerbempfindlichkeit der Materialien lässt sich nach Thum et al. (1969), zitiert nach Ehlbeck & Eberhart (1989, Teil 2, S. 4) mittels der Formzahl K (auch Kerbzahl oder größte Spannungsziffer) beschreiben. Unter der Formzahl K ist der Quotient aus größter Spannung am Kerbgrund σ_{max} und der Nennspannung im Nettoquerschnitt σ_n zu verstehen.

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n}$$

Die Nennspannung σ_n ist die gemittelte Spannungsgröße, die bei Erreichen der Bruchlast F_{max} im Nettoquerschnitt A_{netto} auftritt.

$$\sigma_n = \frac{F_{max}}{A_{netto}}$$

⁴⁹ Nennfestigkeit: Quotient aus Bruchlast und Nettoquerschnittsfläche

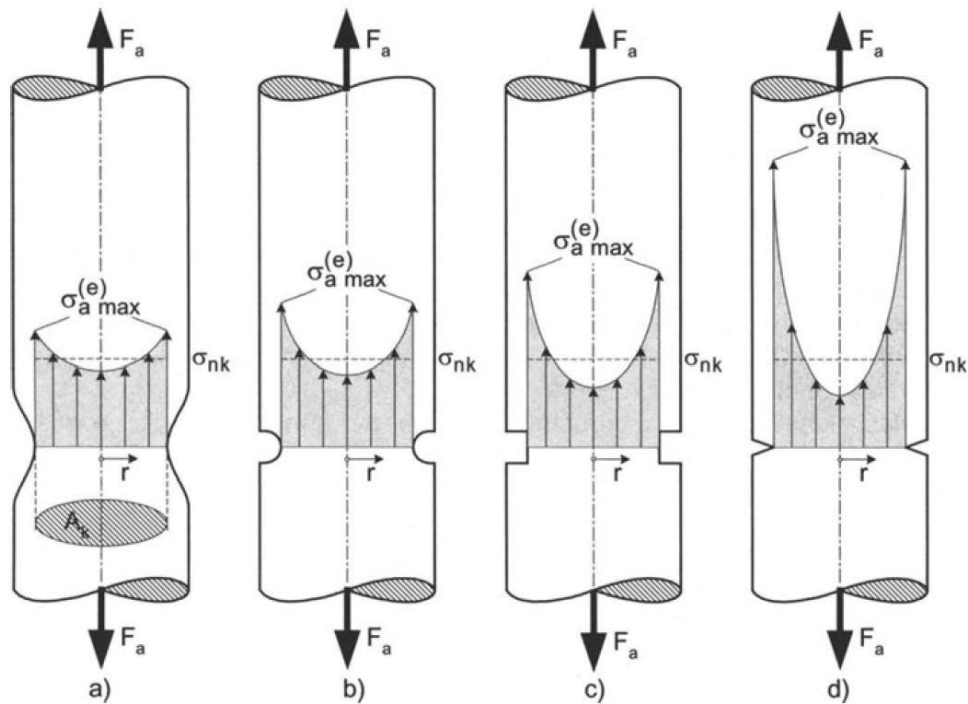


Abbildung 135: Einfluss der Kerbform auf die Höhe und Verteilung der Längsspannungen.
a) = Flachkerbe; b) Rundkerbe; c) Rechteckkerbe; d) = Spitzkerbe

Die Kerbzahl ist geometrieabhängig. Als grobe Anhaltswerte können nach Bürgel (2005, S. 117 f.) die folgenden Kerbzahlen für ein rein elastisches Werkstoffverhalten angesetzt werden:

Rundkerben:	$K \approx 1,5$
Rechteckkerbe:	$K \approx 2$
Spitzkerbe:	$K \approx 3$

Bei Materialien mit duktilem Werkstoffverhalten werden die unter Abbildung 135 dargestellten Spannungsspitzen durch plastische Verformungen im Kerbgrund reduziert (Bürgel, 2005, S. 117), sodass die Kerbzahl im Idealfall nahe 1 liegt.

5.2.2 Modell zur Kraftübertragung an Kreisflächen – (Spannungszustand II)

Eine Kraftübertragung zwischen Stab und zylindrischem Verbindungsmittel erfolgt immer über Lochleibungspressung, also über Druck zwischen der Mantelfläche des Verbindungsmittels und der Innenwandung der Bohrung. Nachfolgend wird die Beanspruchung der Lochleibung in einem homogenen isotropen Werkstoff hergeleitet. In Abbildung 136, S. 139 befindet sich die Bohrung idealisiert in einem in X- und in Y-Richtung unendlich ausgedehnten Querschnitt. Die Kraftresultierende des zylindrischen Verbindungsmittels F greift im Schwerpunkt (1) des Verbindungsmittels an und wirkt in X-Richtung. Es kommt zu einer elastischen Verformung der Lochwandung, mit der eine Relativverschiebung des Ver-

bindungsmittels in X-Richtung um den Betrag P einhergeht. Im elastisch deformierten Zustand (gestrichelter Kreis) liegt der Kreisschwerpunkt in Punkt (2). Die Teilkräfte $F(^{\circ})$ strahlen in einem Winkel von -90° bis $+90^{\circ}$ bezogen auf die Kraft F vom Kreisschwerpunkt (2) in Richtung der Lochleibung aus und verursachen die Spannungen $\sigma(^{\circ})$.

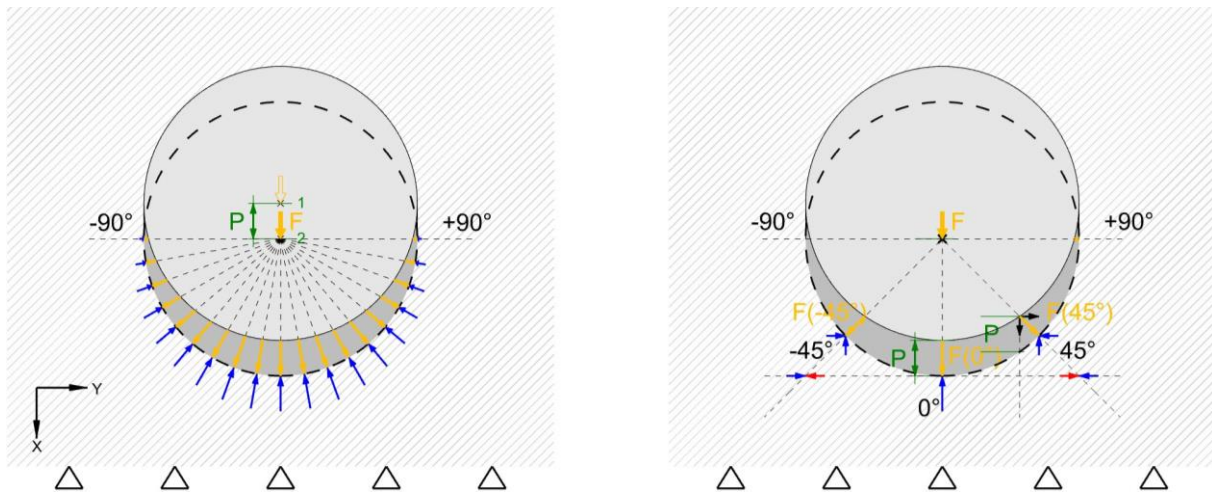


Abbildung 136: Geometrische Herleitung der Spannungsverteilung in der Lochleibung und dem Vorholz. Links: Ausstrahlung der Kraft; rechts: Aufteilung der Kräfte in Normal-X- und Normal-Y-Richtung

Die maximale Druckspannung in der Lochleibung stellt sich unter einem Winkel von 0° zur Beanspruchungsrichtung im Verbindungsmittelschwerpunkt ein. Die Spannungen im Bereich von -90° bis $+90^{\circ}$ können über die Cosinus-Funktion näherungsweise wiedergegeben werden:

$$\sigma_{(n^{\circ})} = \cos (n^{\circ}) \times \sigma_{0^{\circ}}$$

Des Weiteren lassen sich die Spannungsanteile in Normal-X-Richtung und in Normal-Y-Richtung wie folgt ermitteln:

$$\sigma_x (n^{\circ}) = \cos (n^{\circ}) \times \sigma_{0^{\circ}} \times \cos (n^{\circ})$$

$$\sigma_y (n^{\circ}) = \cos (n^{\circ}) \times \sigma_{0^{\circ}} \times \sin (n^{\circ})$$

$\sigma_x (n^{\circ})$	Spannungsanteil in X-Richtung unter einem beliebigen Kraftwinkel
$\sigma_y (n^{\circ})$	Spannungsanteil in Y-Richtung unter einem beliebigen Kraftwinkel
$\sigma_{0^{\circ}}$	Normalspannung parallel der Kraftrichtung

Damit sich ein Kräftegleichgewicht der Y-Komponenten einstellen kann, muss sich in der Lochleibung bei 0° eine Zugkraft in Y-Richtung einstellen, die betragsgleich mit der Horizontalkomponente der Spannung unter einem Winkel von 45° ist.

Mit Hilfe der beiden Gleichungen lässt sich der Spannungsverlauf in der Druckzone der Mantelfläche - gemäß Abbildung 137, S. 140 darstellen:

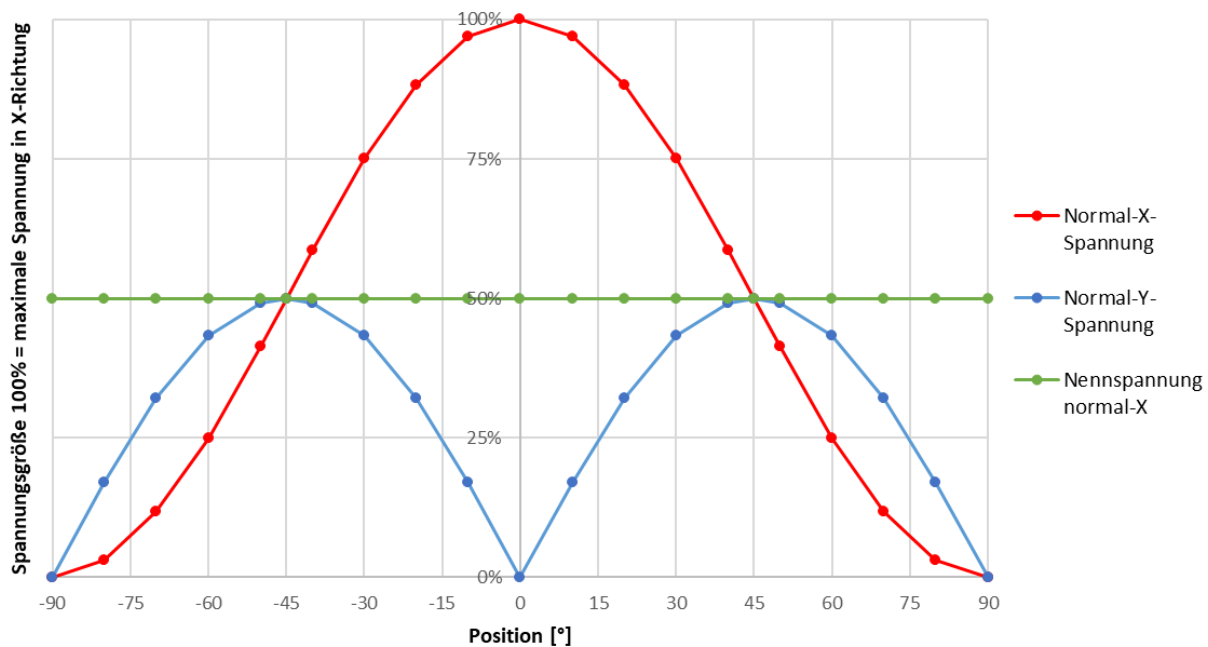


Abbildung 137: Spannungsverteilung im Druckbereich der Lochleibung bei homogenen isotropen Werkstoffen und bei unendlichem Randabstand a_3 und a_4

Die maximale Druckbeanspruchung in X-Richtung liegt bei 0° bezogen auf die Krafttrichtung in der Schwerachse des stiftförmigen Verbindungsmittels. Bei - 90° und bei + 90° sind die X-Normalspannungen 0. Die maximale Druckspannung in Y-Richtung liegt bei - 45° und bei + 45° und entspricht 50 % der Maximalspannung in Normal-X-Richtung.

Abbildung 137 verdeutlicht, dass bei isotropen Werkstoffen die Spannung in Längs- und in Querrichtung unter einem Winkel von 45° bezogen auf die Kraftachse gleich ist. Sie zeigt weiterhin, dass die Normal-X-Spannung unter 0° doppelt so hoch ist wie die mittlere Normal-X-Spannung über der Mantelfläche im Bereich von - 90° bis + 90° und die Normal-Y-Spannung unter 45° halb so groß ist wie die maximale Normal-X-Spannung.

Die maximale Spannung in X- und in Y-Richtung in einem gelochten, isotropen und idealspröden Werkstoff kann wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_{x,max} = \sigma_{x,Bruttoquerschnitt} \times \frac{b}{b-d} \times 2$$

$$\sigma_{y,max} = \sigma_{x,Bruttoquerschnitt} \times \frac{b}{b-d}$$

$\sigma_{x,max}$	Spannungsspitze in X-Richtung
$\sigma_{y,max}$	Spannungsspitze in Y-Richtung
$\sigma_{x,Bruttoquerschnitt}$	homogene Spannung im ungelochten Querschnitt in X-Richtung mit $\sigma_{x,Bruttoquerschnitt} = F/A$
b	Breite des Bruttoquerschnitts
d	Durchmesser des Verbindungsmittels

Bei anisotropen Werkstoffen, wie beispielsweise Holz, kommt es zu einer Umlagerung der Spannungsanteile in Abhängigkeit der Materialsteifigkeit in die zwei Flächenrichtungen, bzw. die drei Raumrichtungen. Demnach stellen sich bei Holz unter einem Winkel von 45° zur Kraftachse größere Spannungen in X-Richtung als in Y-Richtung ein.

5.3 Bemessung von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln nach Johansen

In einem auf Druck beanspruchten Stab verteilen sich die Spannungen im Bereich der Krafteinleitung durch das zylindrische Verbindungsmittel nach dem zuvor hergeleiteten Modell. Der Bauteilanschluss kann dann auf insgesamt drei Arten versagen (vgl. Abbildung 138):

- Typ 1: Überschreiten der Grenzdeformation der Lochleibung
- Typ 2: Aufspalten des Holzes in der Druckzone quer zur Stab- und Kraftachse
- Typ 3: Scherversagen des Verbindungsmittels

In einem auf Zug beanspruchten Stab überlagert sich der Spannungszustand infolge der Kerbwirkung (vgl. Kap. 5.2.1, S. 136 ff.) des Bohrloches mit dem Spannungszustand infolge der Krafteinleitung von der Mantelfläche des Bolzens in die Lochleibung des Stabes (vgl. Kap. 5.2.2 S. 138).

Der Bauteilanschluss kann hier auf insgesamt fünf Arten versagen (vgl. Abbildung 138).

- Typ 1: Überschreiten der Grenzdeformation der Lochleibung
- Typ 2: Aufspalten des Holzes in der Druckzone quer zur Stab- und Kraftachse
- Typ 3: Scherversagen des Verbindungsmittels

und zusätzlich:

- Typ 4: Blockscherversagen des Vorholzes
- Typ 5: Querschnittversagen im Nettoquerschnitt
-

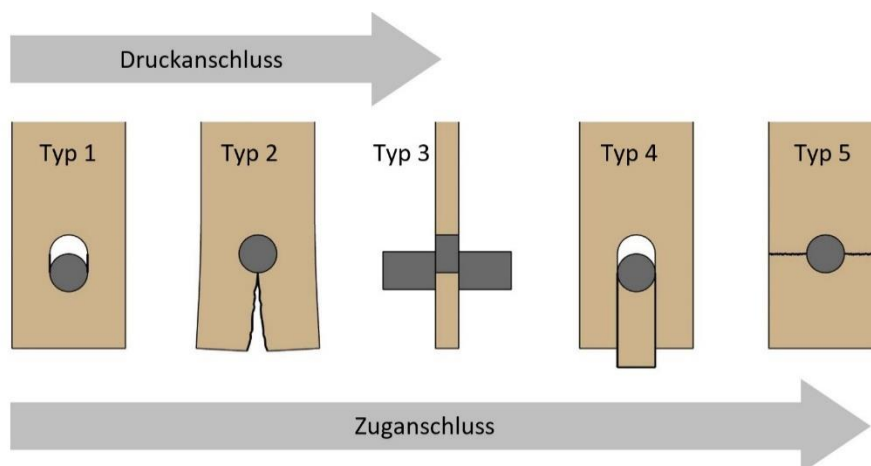


Abbildung 138: Versagensmöglichkeiten von Bauteilanschlüssen mit zylindrischen Verbindungsmitteln

Die Tragfähigkeit von Bauteilanschlüssen über zylindrische (stiftförmige) Verbindungsmittel lässt sich durch die Johansen-Gleichungen bestimmen. Zur Lösung der Gleichung ist die Kenntnis von der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$ und des charakteristischen Fließmomentes $M_{y,Rk}$ der Verbindungsmittel notwendig.

Lochleibungsfestigkeit f_h

Unter der Lochleibungsfestigkeit f_h versteht man die „... mittlere Druckspannung bei der Höchstlast in einem Holzstück oder einer Holzwerkstoffplatte unter der Einwirkung eines steifen geraden Verbindungsmittels“ (DIN EN 383, 2007, S. 3). Die Höchstlast ist dabei die größte Last, die vor Erreichen der maximal zulässigen Verformung der Lochleibung gemessen wird. Die maximal zulässige Verformung beträgt nach DIN EN 383 (2007, S. 8) 5 mm.

Fließmoment M_y

Unter dem Fließmoment M_y versteht man das „... Biegemoment bei der Verformung des Probekörpers durch einen vorgegebenen Biegewinkel“ (DIN EN 409, 2009, S. 4).

Johansen-Gleichung

Für eine zweischnittige Holz-Stahlblech-Verbindung mit mittigem Stahlblech werden nach Johansen (1949) insgesamt drei Versagensmechanismen bei der Ermittlung der Tragfähigkeit je Scherfuge ($F_{v,Rk}$) berücksichtigt:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k} \times t_1 \times d & \text{(I)} \\ f_{h,1,k} \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II)} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(III)} \end{array} \right.$$

$F_{v,Rk}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel

$f_{h,1,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit der Seitenhölzer

t_1 Stärke der Seitenhölzer

d Durchmesser des Verbindungsmittels

$M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmoments des Verbindungsmittels

mit $M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6}$

$F_{ax,Rk}$ charakteristischer Wert des Ausziehwidestands des Verbindungsmittels

$f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit

5.3.1 Versagensarten

Der Anschlussbereich kann wie folgt versagen:

(I) Lochleibungsversagen in den Seitenhölzern

Das Versagen tritt bei Erreichen der Lochleibungsfestigkeit ein, ohne dass das Verbindungsmittel plastifiziert

(II) Versagen des Verbindungsmittels durch die Ausbildung eines Fließgelenkes

Das Versagen tritt bei Erreichen der Lochleibungsfestigkeit und gleichzeitiger Ausbildung eines Fließgelenkes im Mittelblech ein.

(III) Versagen des Verbindungsmittels durch die Ausbildung dreier Fließgelenke

Das Versagen tritt bei Erreichen der Lochleibungsfestigkeit und gleichzeitiger Ausbildung eines Fließgelenkes im Mittelblech und jeweils einem Fließgelenk in den beiden Seitenhölzern ein.

Werden die in DIN EN 1995-1-1 (2010, S. 78) für die Berechnung der Tragfähigkeit an Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln genannten Randabstände eingehalten, kann zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit in Holz oder Furnierschichtholz nachfolgende Regressionsgleichung bis zu Verbindungsmitteldurchmessern von $d = 30$ mm nach DIN EN 1995-1-1 (2010, S. 78) angesetzt werden:

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

Zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit in Sperrholz kann nach (DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 79) die Lochleibungsfestigkeit gemäß nachfolgender Gleichung angenommen werden:

$$f_{h,k} = 0,11 (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

$f_{h,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit

d Verbindungsmitteldurchmesser

ρ_k charakteristischer Wert der Rohdichte des Holzes

Nach Ehlbeck & Kürth (1991), zitiert nach Ehlbeck & Werner (1994, S. 4-3) liegt die Lochleibungsfestigkeit von KP und für Stabdübeln mit $d = 16$ mm und $d = 24$ mm im Mittel bei $174,7$ N/mm².

5.4 Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit stiftförmiger Verbindungsmittel

5.4.1 Einfluss der Wichte / Jahrringbreite / Elastizitätsmodul

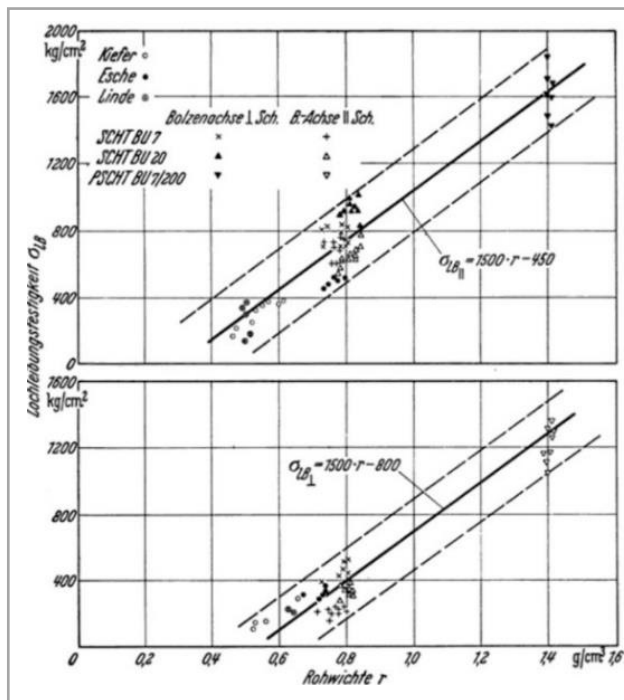


Abbildung 139: Abhängigkeit der Lochleibungs-
festigkeit von der Rohwichte

Nach Fahlbusch (1951) nimmt mit steigender Holzwichte die Lochleibungsfestigkeit längs und quer zur Faser linear zu. Nach Hübner (2013, S. 240) korrelieren Lochleibungsfestigkeit und Jahrringbreite sowie Rohdichte und Lochleibungsfestigkeit für die Holzarten Birke, Esche und Fichte. Bei gleicher Dichte und gleichem Verbindungsmitteldurchmesser liegt nach Ehlbeck & Werner (1992) die Lochleibungsfestigkeit bei Laubhölzern um ca. 10 % oberhalb der von Nadelhölzern.

Der Einfluss der Wichte bzw. der Dichte auf die Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels stiftförmigem Verbindungsmittel geht in die Formel zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit nach DIN EN 1995-1-1 (2010, S. 68 ff.) mit ein (vgl. Kap. 5.3, S. 143).

5.4.2 Einfluss des Kraft - Faser – Winkels

Ehlbeck & Werner (1992) konnten für die Holzarten Buche und Azobé einen signifikanten Zusammenhang zwischen Kraft- und Faserwinkel dokumentieren. Auch für die Holzart Fichte konnte Spörk (2007), zitiert nach Hübner (2013, S. 2018) einen signifikanten Zusammenhang nachweisen (vgl. Abbildung 140).

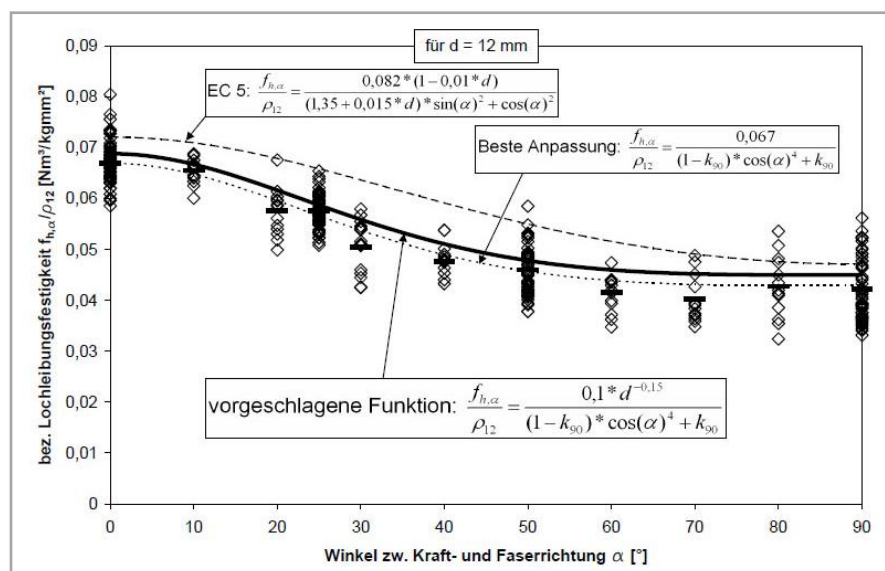


Abbildung 140: Lochleibungsfestigkeit für Fichte für Verbindungsmittel mit $d = 12 \text{ mm}$

In DIN EN 1995 (2010, S. 78) wird der Kraft-Faser-Winkel zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit für unterschiedliche Kraft- Faserwinkel wie folgt berücksichtigt:

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \times \sin(\alpha)^2 + \cos(\alpha)^2}$$

Dabei ist:

$$k_{90} = \begin{cases} 1,25 + 0,015 \times d & \text{für Nadelholz} \\ 1,30 + 0,015 \times d & \text{für Furnierschichtholz} \\ 0,90 + 0,015 \times d & \text{für Laubholz} \end{cases}$$

mit: d = Verbindungsmitteldurchmesser in mm / α = Winkel zwischen Kraft- und Faserrichtung

5.4.3 Einfluss der Temperatur

Da die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul von Holz neben der Holzfeuchte auch von der Temperatur beeinflusst wird (vgl. Abbildung 22, S. 27), geht die Zunahme der Holztemperatur mit einer Abnahme der Lochleibungsfestigkeit einher.

Hübner (2013, S. 231) errechnete „... einen Gradienten von -0,63 % je Kelvin Temperaturanstieg.“ Der Einfluss der Temperatur ist demnach verhältnismäßig gering.

5.4.4 Einfluss der Holzfeuchte

Die mechanischen Eigenschaften von Holz werden neben der Holzdichte stark durch die Holzfeuchte im Holzfeuchtebereich von $u = 0\%$ bis $u = 30\%$ bestimmt. Dabei nimmt insbesondere die Druckfestigkeit und der Druck-Elastizitätsmodul längs- und quer der Faser sowie die Biegefestigkeit und der Biege-elastizitätsmodul ab. Die Längszugfestigkeit verringert sich im gleichen Holzfeuchtebereich jedoch nur geringfügig (vgl. Abbildung 23, S. 28).

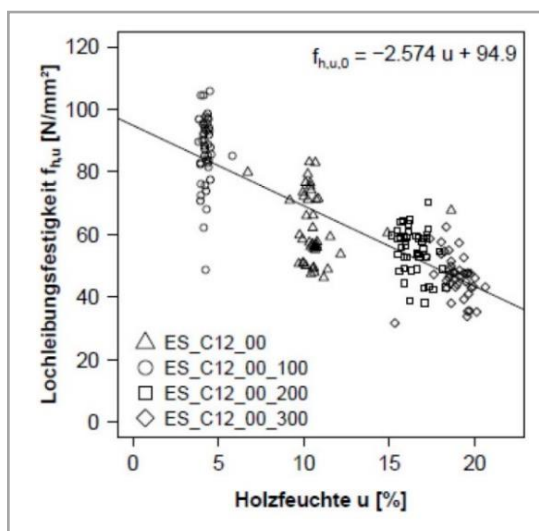


Abbildung 141: Abhängigkeit der Lochleibungs-
festigkeit von der Holzfeuchte

Nach Hübner (2013, S. 243, ff.) hängt die Lochleibungs-
festigkeit von Eschenholz maßgeblich von der Holz-
feuchte ab. Im baupraktisch relevanten Holzfeuchte-
bereich von $u = 5\%$ bis $u = 20\%$ sinken die Lochlei-
bungsfestigkeit um ca. 50 % (vgl. Abbildung 141).

Rammer & Winistorfer (2001) dokumentierten eine
Abnahme der Lochleibungsfestigkeit mit Zunahme der
Holzfeuchte an Southern Pine, Douglas Fir-Larch und
Spruce Pine-Fir. Die Abnahme der Lochleibungsfestig-
keit mit steigender Holzfeuchte wurde zwischen 20 %
und 35 % von $u = 5\%$ bis $u = 20\%$ beziffert. Oberhalb
der Fasersättigung stellte sich mit Zunahme der Holz-
feuchte nur noch eine geringfügige Abnahme der
Lochleibungsfestigkeit ein. Der Einfluss der Holz-
feuchte auf die Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels
stiftförmigem Verbindungsmittel wird durch den k_{mod} -
Wert berücksichtigt

5.4.5 Einfluss des Abstandes zur Stirnholzfläche (Randabstand a_3)

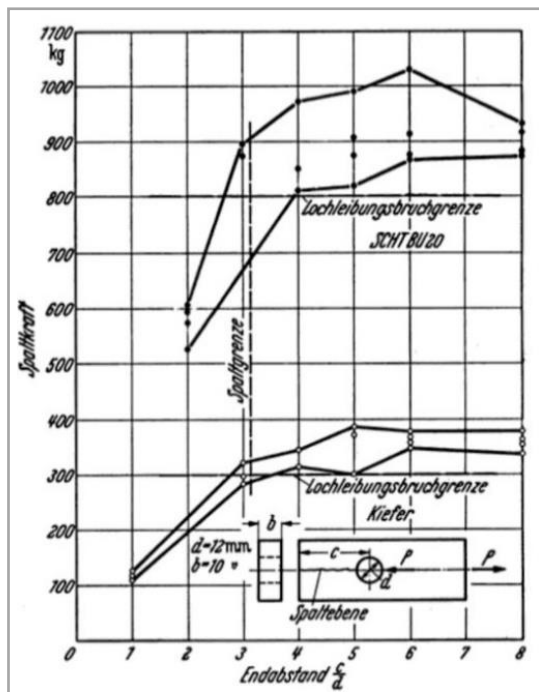


Abbildung 142: Abhängigkeit der Spaltkraft vom Randabstand a_3

An Bolzenverbindungen mit einem Bolzendurchmesser von $d = 12$ mm in Kiefern- und in Buchenfurnierschichtholz ermittelte Fahlbusch (1951) in Abhängigkeit der Vorholzlänge a_3 die Kraft F_{\max} , die zum Aufspalten des Vorholzes unter einer Zugbeanspruchung in Faserlängsrichtung aufgebracht werden muss. Fahlbusch stellte fest, dass ab einem Randabstand von $6 \times d$ die Spaltkraft in Kiefernholz und in Buchenfurnierschichtholz nicht mehr gesteigert werden kann (vgl. Abbildung 142).

In DIN EN 1995 (2010, S. 80) werden die Mindestrandabstände für Verbindungsmittel definiert. Für Stabdübel, Passbolzen und Bolzen liegt der Randabstand a_3 bei Zugstäben bei $7 \times d$ und mindestens 80 mm. Bei auf Druck beanspruchten Stäben fallen die Randabstände mit $3 \times d$ geringer aus, da die Stabkraft nicht um das Verbindungsmittel herumgeführt werden muss.

5.4.6 Einfluss des Verbindungsmitteldurchmessers

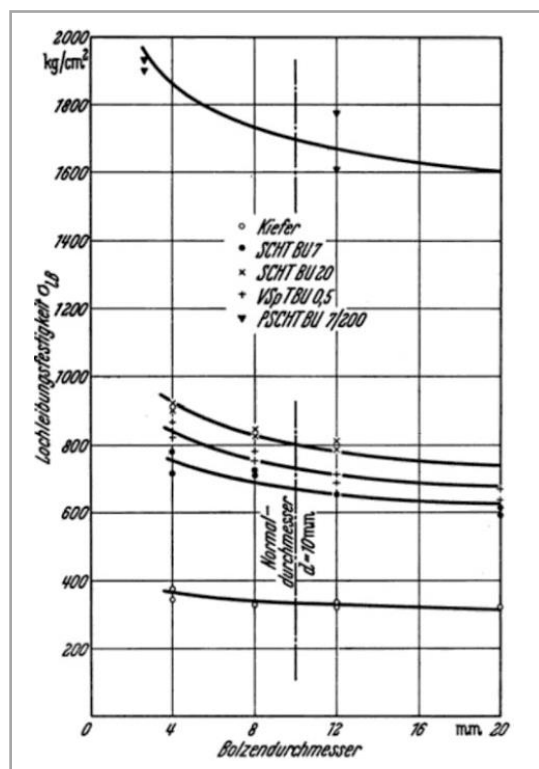


Abbildung 143: Lochleibungsfestigkeit in Abhängigkeit des Bolzendurchmessers

Fahlbusch (1951) untersuchte den Einfluss des Verbindungsmitteldurchmessers auf die Lochleibungsfestigkeit in Kiefernholz, Buchen-Furnierschichtholz, Buchen-Sperrholz und Buchen-Furnier-Pressholz. Die Lochleibungsfestigkeit nimmt mit Zunahme des Verbindungsmitteldurchmessers ab, was sich durch den Größeneffekt erklären lässt. „Der Größeneffekt tritt bei allen Werkstoffen in unterschiedlicher Ausprägung auf und beschreibt den Effekt, dass Probekörper mit größerem Volumen im Vergleich mit jenen kleineren Volumens zu geringeren Festigkeitskenngrößen führen [...]“ (Schickhofer, 2006). Er liegt darin begründet, dass mit zunehmender Probengröße die Wahrscheinlichkeit steigt, dass eine Fehlstelle zum Probenbruch führt (Pierce, 1976). Der Einfluss des Verbindungsmitteldurchmessers auf die Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels stiftförmiger Verbindungsmittel geht vereinfacht linear in die Gleichung zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit (s. S. 143) mit ein.

5.4.7 Einfluss hintereinander angeordneter Verbindungsmittel und notwendiger Montage-toleranzen

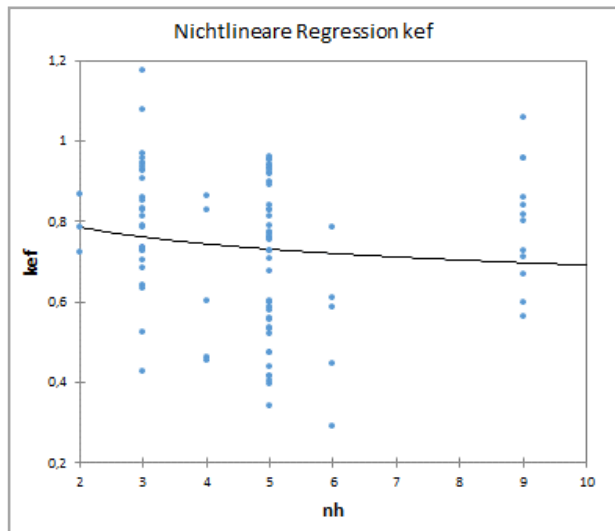


Abbildung 144: Einfluss des Abstandes a_1 auf die Tragfähigkeit

Verbindungsmittel werden üblicherweise in Abhängigkeit der Anschlussausbildung in mehreren hintereinander angeordneten Reihen (n_h) in die Hölzer eingebracht. Colling et al. (2013, S. 58) untersuchten die Wirksamkeit hintereinander in Krafrichtung angeordneter Verbindungsmittel. Obwohl die Ergebnisse stark streuen, ist zu erkennen, dass mit Zunahme der hintereinander angeordneten Reihen die effektive Lochleibungsfestigkeit $f_{h,ef} = f_h \times k_{ef}$ abnimmt (vgl. Abbildung 144).

Der Einfluss der Verbindungsmittelreihen wird nach Goris (2012, S. 9.42) wie folgt berücksichtigt:

$$F_{v,Rd,ef} = k_{ef} \times n_{VM} \times n_{SF/VM} \times F_{v,Rd}$$

n_{VM} Anzahl der Verbindungsmittel

$n_{SF/VM}$ Anzahl der Scherfugen pro Verbindungsmittel

k_{ef} Spaltfaktor $k_{ef} = \frac{n_h^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \times d}}}{n_h} \leq 1$

a_1 Abstand der Verbindungsmittel hintereinander

n_h Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander

In DIN EN 1995-1 (2010, S. 114) sind Bohrlochtoleranzen von $\pm 0,1$ mm gegenüber dem Verbindungsmittel zulässig. Nach Werner (1993), zitiert nach Holic (2016, S. 25) wirken sich Toleranzen bis 2 mm nicht signifikant festigkeitsmindernd auf die Lochleibungsfestigkeit aus.

Größere Toleranzen führen dazu, dass sich die Lochleibung stark deformieren muss, bis sie an der Mantelfläche des Verbindungsmittels vollständig anliegt. Dadurch werden lokale Spannungsspitzen verursacht, die das Aufspalten des Holzes begünstigen (Hübner, 2013, S. 226).

Des Weiteren können Ungenauigkeiten in der Fertigung zu einer ungleichmäßigen Beanspruchung von in Reihe angeordneter Verbindungsmittel führen. In Abbildung 145, S. 148 sind die Bohrungen im Holzquerschnitt und im Stahlblech nicht deckungsgleich. Während das Verbindungsmittel links bereits belastet ist, ist das Verbindungsmittel in der Mitte und das Verbindungsmittel rechts noch unbelastet. Erst wenn das Lochspiel s durch elastische und plastische Verformungen abgebaut ist, können die beiden unbelasteten Verbindungsmittel aktiviert werden. Zur gleichmäßigen Verteilung der Lochleibungsbeanspruchungen und damit zur sicheren Bemessung der Verbindung sind daher grundsätzlich duktile Anschlüsse auszubilden.

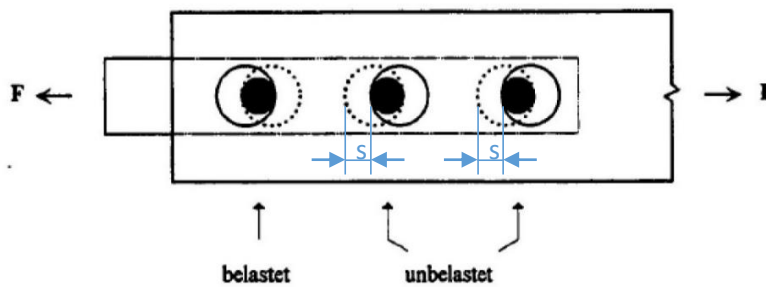


Abbildung 145: Einfluss von Ungenauigkeiten zwischen den Bohrungen der Laschen und des Holzes

5.4.8 Einfluss der Bolzenschlankheit und der Verbindungsmittelfestigkeit

Unter der Bolzenschlankheit λ ist der Quotient aus wirksamer Verbindungsmittellänge t [mm] und Verbindungsmitteldurchmesser d [mm] zu verstehen. Im Vergleich zu gedrunenen Verbindungsmitteln ist das axiale Flächenträgheitsmoment I_{yy} und das Widerstandsmoment W_y bei schlanken Verbindungsmitteln gering und damit sind elastische Verformungen sowie plastische Verformungen infolge der Überschreitung der Streckgrenze verhältnismäßig groß. Dies hat zur Folge, dass mit Zunahme der Bolzenschlankheit die Kräfte ungleichmäßiger von der Mantelfläche des Verbindungsmittels auf die Lochleibungsfläche übertragen werden (s. auch Kap. 6.1.1, S. 172 ff.). Infolge dessen entstehen Spannungsspitzen, die die Tragfähigkeit des Anschlusses herabsetzen. Nach Trayer (1932, S. 8) kann sowohl für Tanne, Kiefer und Fichte (Abbildung 146, S. 149) bis zu einer Bolzenschlankheit von 3,5 von einer annähernd gleichmäßigen Verteilung der Kraft ausgegangen werden. Der Einfluss der Bolzenschlankheit auf die Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels stiftförmigem Verbindungsmittel, wird in den Johansen-Gleichungen durch einen mögliche Ausbildung von einem oder mehreren Fließgelenken berücksichtigt (vgl. Kap. 5.3, S. 142).

Neben der Bolzenschlankheit hängen plastische Verformungen von der Materialfestigkeit - insbesondere von der Streckgrenze - des Verbindungsmittels ab. Nach Trayer (1932, S. 21) kann die Lochleibungsfestigkeit unter Einsatz schlanker Verbindungsmittel gesteigert werden, wenn Metalle mit hoher Streckgrenze eingesetzt werden. In Abbildung 147, S. 149 sind relative Lochleibungsspannungen in Abhängigkeit der Bolzenschlankheit für zwei Metalle mit unterschiedlicher Streckgrenze dargestellt. Je höher die Streckgrenze ist, desto höher ist die Tragfähigkeit bei Eintritt plastischer Verformungen. Der Einfluss der Verbindungsmittelfestigkeit auf die Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels stiftförmigem Verbindungsmittel wird in den Johansen-Gleichungen durch das Fließmoment $M_{y,Rk}$ berücksichtigt (vgl. Kap. 5.3, S.142).

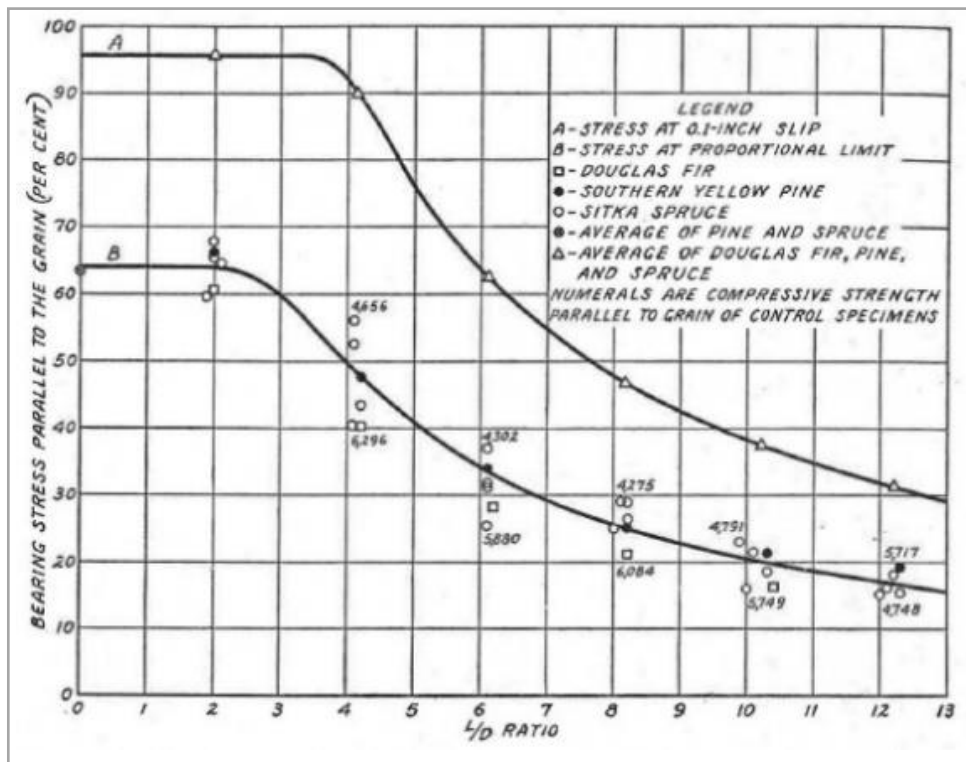


Abbildung 146: Relative Lochleibungsspannung

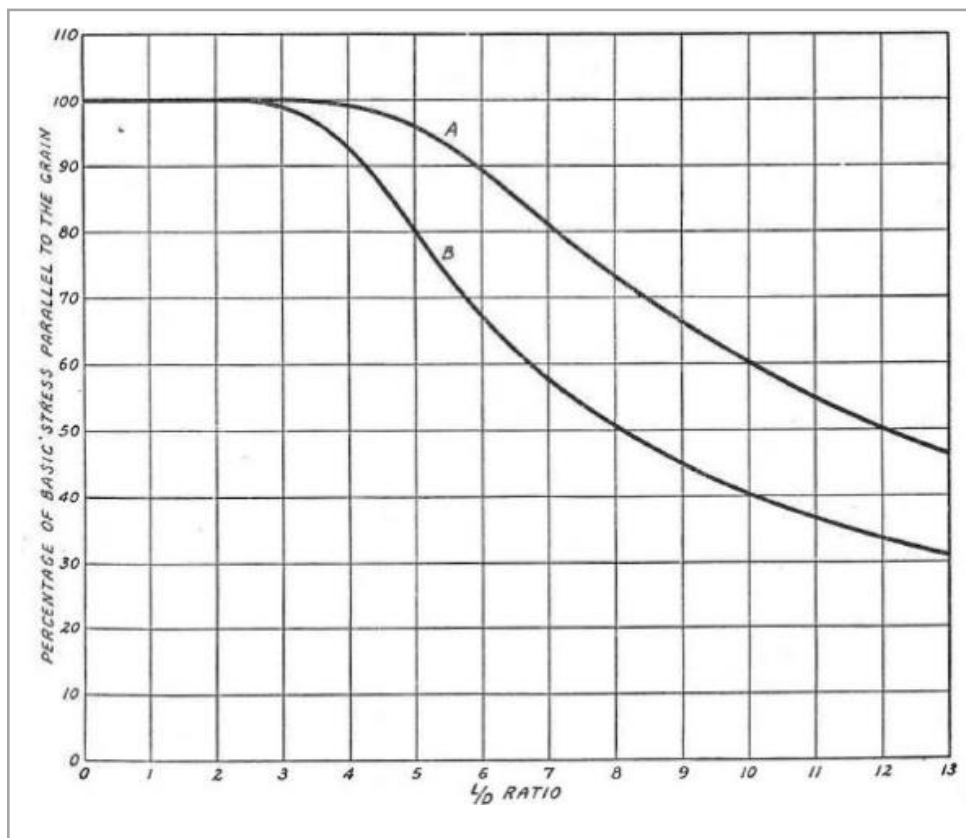


Abbildung 147: Relative Lochleibungsspannung in Abhängigkeit der Fließgrenze. A = 125.000 Pfund/Inch² (860 N/mm²) und B 45.000 Pfund/Inch² (310 N/mm²)

5.4.9 Einfluss durch die Belastung als Stabdruck- oder Stabzugkraft

Die Darstellungen unter Abbildung 148 und Abbildung 149, S. 150 beruhen auf Simulationsstudien mit Hilfe des FE-Programmes Ansys. Als Material wurde Fichtenholz gemäß der Tabelle 30 im Anhang, S. A-2 definiert.

Betrachtung der Spannungen in Richtung der Stabachse

In einem Druckstab (vgl. Abbildung 148, links, S. 150) konzentrieren sich die Druckspannungen vor dem stiftförmigen Verbindungsmittel (Vorderseite), auf der der Kraftrichtung zugewandten Seite der Lochleibung (I). Das Vorholz (II) hingegen wie auch der Nettoquerschnitt (III), werden nicht beansprucht.

Im Zugstab (vgl. Abbildung 148, rechts) findet eine Kraftumlenkung (IV) um das Verbindungsmittel herum statt. Entlang der Stabachse bildet sich ein Druckfeld hinter dem stiftförmigen Verbindungsmittel (Rückseite), auf der der Kraftrichtung abgewandten Seite (V) aus. In der Lochleibung bauen sich im Nettoquerschnitt Zugspannungsspitzen auf, die die Spannung im ungeschwächten Querschnitt um ein Vielfaches übersteigen.

Betrachtung der Spannungen quer zur Stabachse

Aufgrund der Spannungskonzentration (vgl. Abbildung 148, (I) und (V)) bauen sich im Stab vor bzw. hinter (je nach Belastungsart) Zugspannungen quer zur Stabachse auf, die ein Aufspalten des Holzes begünstigen (vgl. Abbildung 149, (VI) und (VII)). Die Querzugbeanspruchung am Stabende nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen Verbindungsmittel und Stabende ab.

Aus der Spannungsverteilung (Abbildung 148 und Abbildung 149) lassen sich die in Abbildung 150, S. 151 dargestellten Stabwerkmodelle für einen Stabanschluss auf Druck (links) und Zug (rechts) ableiten.

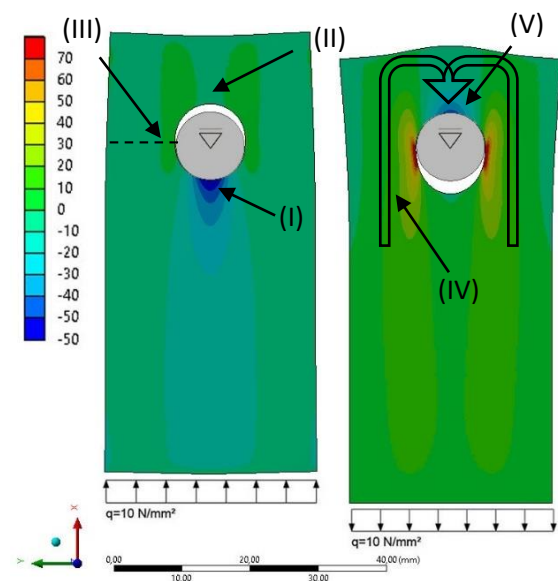


Abbildung 148: Spannungsverteilung um das Verbindungsmittel **längs** der Stabachse für Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. Blau = Druck; rot = Zug

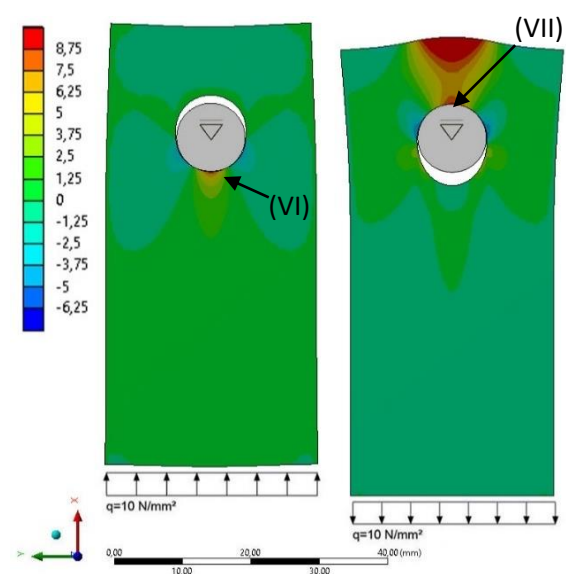
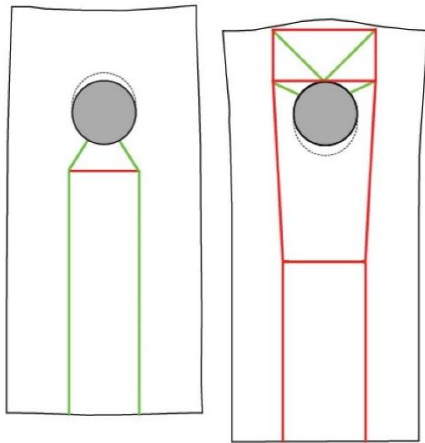


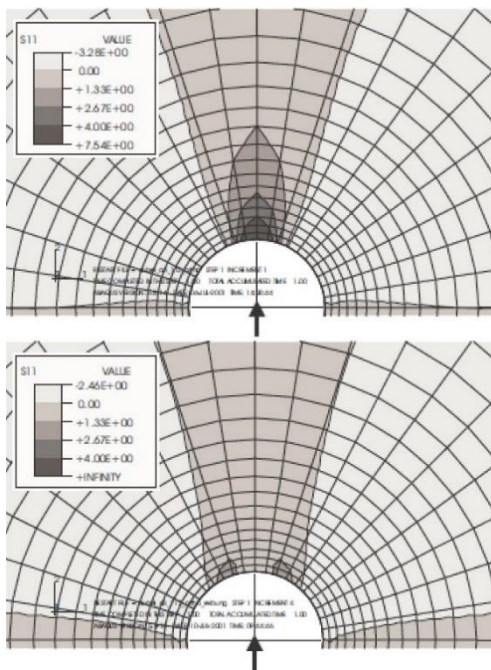
Abbildung 149: Spannungsverteilung um das Verbindungsmittel **quer** der Stabachse für Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. Blau = Druck; rot = Zug



Der Einfluss der Krafrichtung auf die Tragfähigkeit des Stabanschlusses wird in DIN EN 1995-1 (2010, S. 78 ff.) mit einer Differenzierung in *beanspruchtes Hirnholzende* und *unbeanspruchtes Hirnholzende*, verbunden mit entsprechenden Mindestabständen (a_3), berücksichtigt.

Abbildung 150: Stabwerkmodelle für einen Druckanschluss (links) und einen Zuganschluss (rechts) in Fichtenholz unter Berücksichtigung des anisotropen Materialverhaltens. (grün = Druck; rot = Zug)

5.4.10 Einfluss der Verbindungsmitteloberfläche



Die Rauheit der Verbindungsmitteloberfläche hat Einfluss auf die Querspannungsverteilung in der Lochleibung. Bei rauen Oberflächen verteilen sich nach Schmid (2002, S. 23 f., vgl. Abbildung 151) die Querspannungen homogener, was zu einer Minimierung der Rissanfälligkeit des Vorholzes führen kann. In Lochleibungsversuchen mit glatten ($\mu = 0,1$) und mit rauen ($\mu = 0,4$) Stabdübeln dokumentierten Serrano & Sjödin (2007, S. 9) eine Steigerung der Lochleibungsfestigkeit von ca. 40 % an Stabdübelverbindungen mit rauen Mantelflächen im Vergleich zu Stabdübelverbindungen mit glatten Mantelflächen.

Abbildung 151: Querspannungsverteilung in Abhängigkeit der Reibung zwischen Manteloberfläche und Lochleibung. Oben: $\mu = 0$; unten: $\mu = 0,339$

5.4.11 Einfluss des Randabstandes a_4 (Nettoquerschnitt)

Für Längsbeanspruchungen im Zugstab wirkt sich eine Vergrößerung des Randabstandes a_4 insbesondere für duktile Materialien festigkeitssteigernd aus, da mit der Zunahme des Randabstandes der Unterschied von Nettoquerschnittsfläche zu Bruttoquerschnittsfläche und damit auch die Spannungen im Nettoquerschnitt geringer ausfallen (vgl. Kap. 5.2).

5.5 Zusammenfassung und Folgebetrachtungen

Die Leistungsfähigkeit von Lochleibungsanschlüssen wird – wie die Leistungsfähigkeit von Keilzinkenverbindungen – durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren – insbesondere Werkstoffspezifischer

Faktoren - beeinflusst. Der Übersichtlichkeit halber werden die einzelnen Faktoren sowie deren Einflussgröße unter Tabelle 14 zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 14: Einflussfaktoren auf die Leistungsfähigkeit von Lochleibungsanschlüssen in nativem Holz

starker Einfluss	mittelstarker Einfluss	geringer Einfluss	kein Einfluss
Wichte / Jahrringbreite / Elastizitätsmodul	Kraft - Faser – Winkel	Verbindungsmittel- durchmesser	Temperatur
Bolzenschlankheit und Verbindungsmittel- festigkeit	Holzfeuchte	hintereinander angeord- nete Verbindungsmittel und notwendige Monta- getoleranzen	
Belastung als Stabdruck- oder Stabzugkraft	Abstände zur Stirnholz- fläche (Randabstand a3)	Verbindungsmittel- oberfläche	
	Randabstände a4 (Nettoquerschnitt)		

Die Berechnung von Lochleibungsfestigkeiten in nativem Holz ist im Vergleich zu Stahl komplex. Mit den in (DIN EN 1995-1, 2010) aufgeführten Formeln kann die Komplexität jedoch kaum wiedergegeben werden, da - wie oben aufgeführt - der jeweilige Einfluss auf die Festigkeit von Holzart zu Holzart und zu Holzwerkstoffart unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Außerdem wird der exponentielle Charakter des Größeneffektes vernachlässigt und für Stabdübel von einem Durchmesser $d = 6\text{ mm}$ und bis zu einem Durchmesser $d = 30\text{ mm}$ eine lineare Veränderung der Lochleibungsfestigkeit zugrunde gelegt. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Streuung der Rohdichte geringer ist als die Streuung der Lochleibungsfestigkeit, sodass die Vorfaktoren bei der Berechnung charakteristischer Lochleibungsfestigkeiten angepasst werden müssen (Ehlbeck & Werner, 1992). Desweiteren wird in den in DIN EN 1995-1 (2010) aufgeführten Formeln zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit nicht zwischen Nadel- und Laubholz differenziert und das höhere Festigkeitspotential von Laubhölzern demnach auch nicht ausgeschöpft.

Die hohe Lochleibungsfestigkeit von KP rührt daher, dass KP mit ca. $1.300\text{ kg/m}^3 - 1.400\text{ kg/m}^3$ eine überaus hohe Dichte aufweist. Weil KP - verglichen mit nativem Holz - äußerst langsam Feuchtigkeit aufnimmt und ebenfalls äußerst langsam Feuchtigkeit abgibt und damit sehr träge auf äußere klimatische Bedingungen reagiert, ist die Schwankung der Holzausgleichsfeuchte verhältnismäßig gering. Der Einfluss schwankender Materialfeuchten auf die Lochleibungsfestigkeit ist somit unbedeutend. Die gleichbleibend hohen Lochleibungsfestigkeiten machen KP somit für den Einsatz in Nutzungsklasse 2 oder 3 interessant, in jenen Bereichen also, in denen im Jahresverlauf mit einer hohen Spreizung der Holzfeuchten zu rechnen ist.

Die Spaltgefahr des Vorholzes kann durch einen geeigneten Plattenaufbau des KPs herabgesetzt und dadurch die Randabstände erheblich minimiert werden, was dazu führt, dass der Anteil des sehr teuren Werkstoffs auf ein Minimum begrenzt werden und damit die Wirtschaftlichkeit verstärkter Anschlüsse gesteigert werden kann.

Bei sternförmigem Plattenaufbau stellt sich in der Plattenebene ein nahezu isotropes Materialverhalten ein; Kraft-Faser-Winkel haben dann keinen Einfluss auf die Lochleibungsfestigkeit (vgl. Kap. 6.3.2.3 S. 217 ff.).

5.6 Lochleibungsfestigkeiten von KP

Für die Bestimmung der Tragfähigkeit an mit KP verstärkten Stabenden wurde zunächst die Lochleibungsfestigkeit von KP an 15 mm starken Prüfkörpern aus Dehonit KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q und an Dehonit BE 335-1 50 % L / 50 % Q untersucht. Die Furniere von Dehonit KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q sind zu 2/3 in Krafrichtung orientiert und zu 1/3 quer zur Krafrichtung; die Furniere von Dehonit KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q sind zu 50 % in Krafrichtung und zu 50 % quer zur Krafrichtung orientiert. Es wurden Untersuchungen an glatten Bolzen ($\mu = 0 - 0,1$) und an hochfesten Schrauben mit Gewindengang durchgeführt.

Für den Bauteilanschluss wurde im Vorfeld ein Verhältnis von Bolzendurchmesser d zur Stabbreite b von $1/3$ festgelegt, was einem Randabstand von $a_4 = 1,5 \times d$ entspricht. Die Festlegung erfolgte aufgrund theoretischer Untersuchungen hinsichtlich der Kraftübertragung an kreisrunden Flächen und der Kerbwirkung von Bohrungen in gelochten Querschnitten (vgl. Kap. 5.2).

Es wurden sowohl Druckversuche als auch Zugversuche durchgeführt (vgl. Abbildung 152).

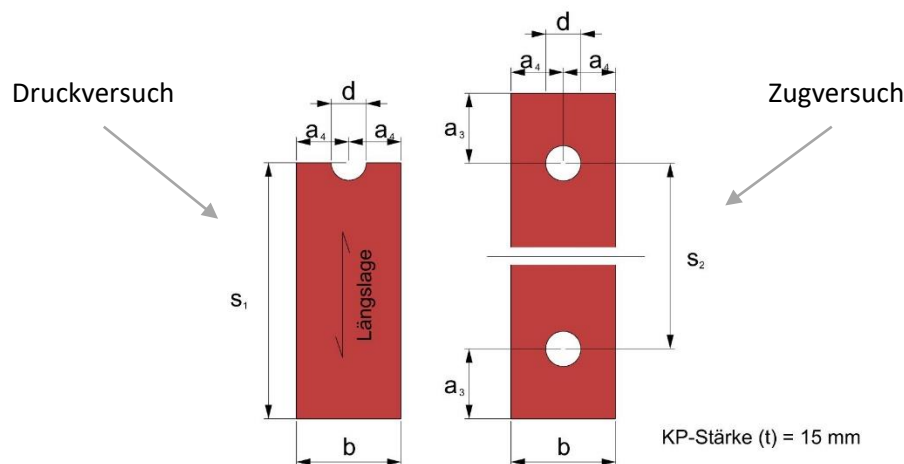


Abbildung 152: Randabstände für die unterschiedlichen Versuche zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit

In DIN EN 383 (2007) sind die Prüfverfahren zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit definiert. Die Norm gibt Randabstände an, die bei den Prüfungen zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit einzuhalten sind⁵⁰.

Ermittlung von „bezogenen“ Lochleibungsfestigkeiten für KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q

Der Randabstand quer zur Faser a_4 wird in DIN EN 383 (2007, S. 6) mit $3 \times d$ und in Faserrichtung a_3 mit $7 \times d$ angegeben. Aufgrund der im Vergleich zu nativem Nadelholz sehr hohen mechanischen Festigkeiten von KP, macht die Einhaltung der in DIN EN 383 (2007) genannten Randabstände für den innerhalb dieser Arbeit beschriebenen Anwendungsfall als Verstärkung im Bauteilanschluss jedoch keinen Sinn. Eine Einhaltung der Randabstände a_3 und a_4 würde zu sehr niedrigen Beanspruchung des Hochleistungswerkstoffes und damit zu einer minimalen Ausschöpfung des Werkstoffpotentials führen. Mit dem Werkstoff KP lassen sich die Randabstände für Bohrungen an die des Stahlbaus annähern.

Die mit der Unterschreitung der in DIN EN 383 (2007) genannten Randabstände ermittelten Lochleibungsfestigkeiten sind daher als *bezogene Lochleibungsfestigkeiten* f_h^* für den innerhalb dieser Arbeit

⁵⁰ Innerhalb dieser Arbeit erfolgt die Bezeichnung der Randabstände gemäß der Bezeichnung in Goris (2012, S. 9.40), die sich von denen der Norm DIN EN 383 (2007, S. 6) unterscheiden.

beschriebenen konkreten Anwendungsfall zur Verstärkung von Stabenden unter einem Randabstand $a_4 = 1,5 d$ zu verstehen. Sie können demnach weder mit den von Ehlbeck & Kürth (1991), zitiert nach Ehlbeck & Werner (1994, S. 4-3) ermittelten Lochleibungsfestigkeiten noch mittels der in DIN EN 1995 (2010) genannten Formeln (Kap. 5.3, S. 143) zur Berechnung von Lochleibungsfestigkeiten unmittelbar verglichen werden. Die Prüfung erfolgte zudem ohne Belastungsvorzyklus. Die Belastung der Probe wurde stattdessen mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit aufgebracht. Grundsätzlich fallen die ermittelten Festigkeiten unter zyklischer Vorbelastung jedoch höher aus als die ermittelten Festigkeiten ohne zyklische Vorbelastung (Mohammad & Quenneville, 1998). Aus diesem Grund sind die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Festigkeiten als *konservativ* zu verstehen.

Die bezogene Lochleibungsfestigkeit f_h^* ist ferner als die Festigkeit zu verstehen, unter der der Bruch eingetreten ist. Zum Zeitpunkt des Bruches lag die Deformation der Lochleibung weit unterhalb der für die Bestimmung der Lochleibung definierten Grenzverformung von 5 mm. Somit ist die Ausbildung reversibler Bauteilanschlüsse in KP möglich.

5.6.1 Ergebnis aus Druckversuchen ⁵¹

DIN EN 1995 (2010, S. 79) gibt zur Ermittlung der Lochleibungsfestigkeit an Sperrholz folgende Regressionsgleichung an:

$$f_{h,k} = 0,11 (1 - 0,01 \times d) \times \rho_k$$

d in [mm] und ρ_k in $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Das innerhalb der Arbeit verwendete KP ist ein hochverdichtetes Sperrholz. Aus diesem Grund wird zunächst die Eignung der o.g. Gleichung zur Berechnung der Lochleibungsfestigkeit von KP überprüft. Für KP Dehonit BE 335-1 67 % L / 33 % Q mit einer Dichte $\rho_{mean} \sim \rho_k \sim 1400 \text{ kg/m}^3$ berechnen sich die charakteristischen Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,k}$ mit der angegebenen Gleichung zu:

$$123,2 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 20 \text{ mm}$$

$$107,8 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 30 \text{ mm}$$

$$92,4 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 40 \text{ mm}$$

In den Druckversuchen (vgl. Abbildung 153, S. 155) wurden nachfolgende mittlere bezogenen Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,mean}^*$ ermittelt:

$$261,8 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 20 \text{ mm}$$

$$245,8 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 30 \text{ mm}$$

$$242,8 \text{ N/mm}^2 \text{ für } d = 40 \text{ mm}$$

Aus diesen lässt sich nachfolgende Regressionsgleichung zur Bestimmung der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,mean}^*$ ableiten:

$$f_{h,mean}^* = -0,0035d^3 + 0,3805d^2 - 14,038d + 418,2$$

⁵¹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.1, S. A-36

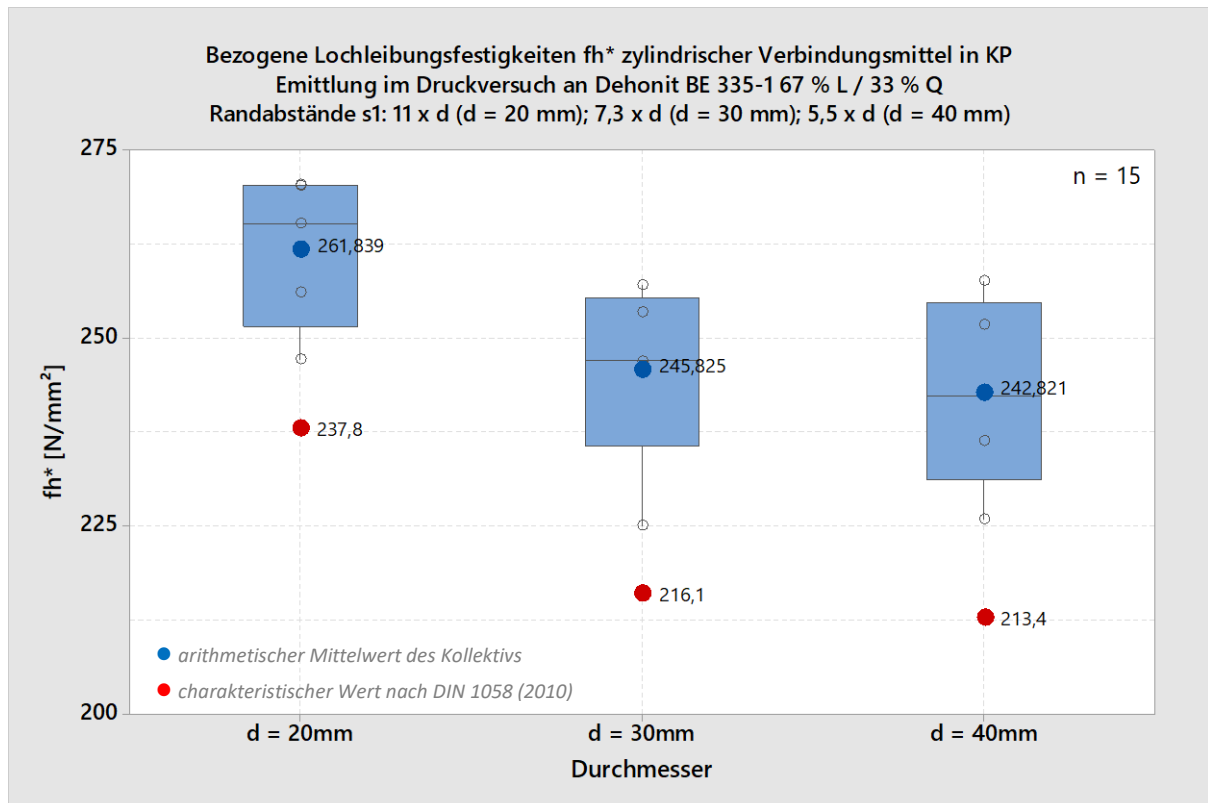


Abbildung 153: Ermittelte Lochleibungsfestigkeiten im Druckversuch

Die in den Druckversuchen ermittelten charakteristischen bezogenen Lochleibungsfestigkeiten $f_{h,k}^*$ lagen bei:

237,8 N/mm² für $d = 20$ mm

216,1 N/mm² für $d = 30$ mm

213,4 N/mm² für $d = 40$ mm

Aus diesen lässt sich nachfolgende Regressionsgleichung zur bestimmung der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}^*$ ableiten:

$$f_{h,k}^* = 88,8\% \times (-0,0035d^3 + 0,3805d^2 - 14,038d + 418,2)$$

Die ermittelte bezogene Lochleibungsfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q lag damit etwa doppelt so hoch wie die mittels der Gleichung berechneten Lochleibungsfestigkeit und 27 % oberhalb der von Ehlbeck & Kürth (1991), zitiert nach Ehlbeck & Werner (1994, S. 4-3) ermittelten Lochleibungsfestigkeit von 174,7 N/mm². Für die Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q eignet sich die Gleichung aus DIN EN 1995 demnach nicht.

Innerhalb der Versuchsreihen zeigte sich eine klare Abhängigkeit der bezogenen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}^*$ vom Bolzendurchmesser d . Mit steigendem Bolzendurchmesser d nimmt die bezogene Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}^*$ ab. Dabei strebt sie gegen die Druckfestigkeit $f_{c,0}$ von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q (vgl. Abbildung 154, S. 156). Die charakteristische bezogene Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}^*$ von KP BE 335-1 ist an Bolzendurchmessern von 20 mm bis 40 mm um ca. das **11-fache** höher als die charakteristische Lochleibungsfestigkeit $f_{h,k}$ von Fichte C24.

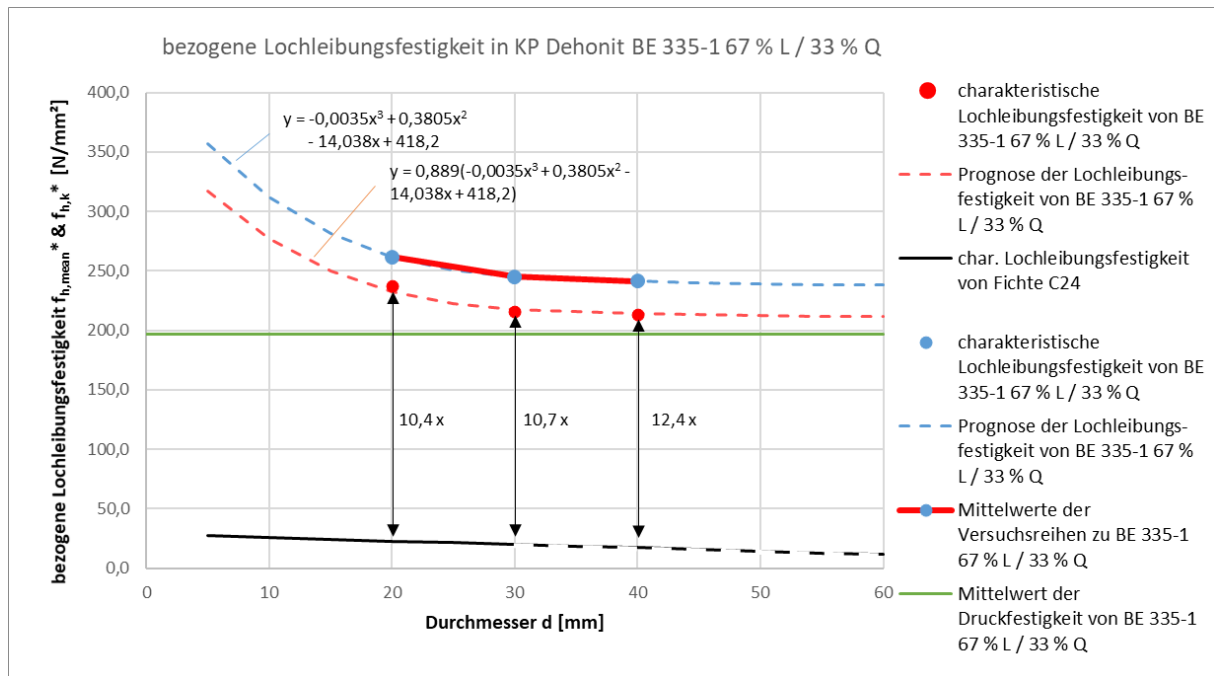


Abbildung 154: Mittlere Lochleibungsfestigkeit an KP Dehonit BE 335-1 67 % L / 33 % Q

Bruchbild

Die Prüfkörper versagten allesamt durch Aufspalten des KPs in der Druckzone in Belastungsrichtung. Es zeigten sich nur sehr geringe plastische Verformungen der Lochleibung von maximal 3 mm (vgl. Abb. Abbildung 155). Im Gegensatz zu den Zugversuchen an KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q (vgl. Kap. 3.6.1) kündigte sich der Bruch durch plastische Verformungen an (vgl. Kraft-Weg-Diagramme im Prüfprotokoll Im Anhang Kap. A-3.5.1.1, S. A-36).

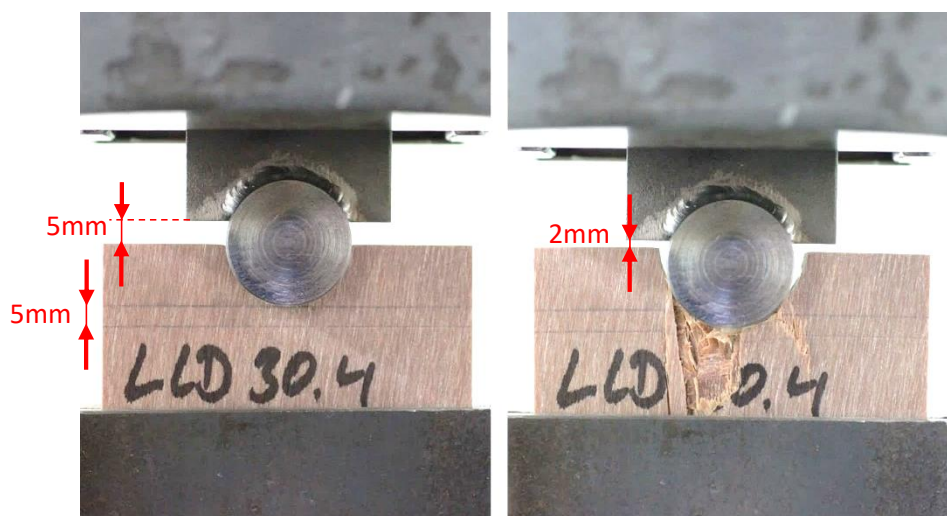


Abbildung 155: Modifizierter Lochleibungsdruckversuch, links: vor Versuchsbeginn; rechts: Bruch nach Erreichen der Höchstlast

Die ermittelten Kennwerte der bezogenen Lochleibungsfestigkeit und der Vergleichsfestigkeit sind in Tabelle 34, im Anhang, S. A-4 aufgeführt.

5.6.2 Ergebnis aus Zugversuchen

5.6.2.1 Auswirkung des Verbindungsmitteldurchmessers und des Randabstandes a_3 auf die bezogene Lochleibungsfestigkeit ⁵²

Neben den unter Kap. 5.6.1 aufgeführten Druckversuchen wurden Zugversuche an Dehonit BE 335-1 67 % L / 33 % Q und an Dehonit BE 335-1 50 % L / 50 % Q durchgeführt. Die Ergebnisse der Zugfestigkeiten sind wiederum als bezogene Lochleibungsfestigkeiten f_h^* für den innerhalb dieser Arbeit beschriebenen konkreten Anwendungsfall zur Verstärkung von Stabenden unter einem Randabstand $a_4 = 1,5 \times d$ und einem Randabstand $a_4 = 1,5 \times d$ bis $2,5 \times d$ zu verstehen.

Die Aufbereitung der Prüfdaten zeigt zum einen, dass eine Zunahme des Randabstandes a_3 bei gleichbleibendem Verbindungsmitteldurchmesser d zu signifikant höheren bezogenen Lochleibungsfestigkeiten führt (vgl. Abbildung 156, S. 158). Sie zeigt weiterhin, dass unter gleichen Randabständen a_3 und a_4 die bezogene Lochleibungsfestigkeit f_h^* der KP-Querschnitte mit Zunahme des Bolzendurchmessers tendenziell abnimmt. Für die Verbindungsmittel mit den Durchmessern $d = 8 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$ konnte eine vergleichsweise geringe bezogene Lochleibungsfestigkeit f_h^* dokumentiert werden, die unterhalb der Lochleibungsfestigkeit lag, die an 20 mm starken Bolzen ermittelt wurden. An den Prüfkörpern aus Charge 2 zeigten sich leicht höhere Festigkeiten (orange eingefärbte Box Plots in Abbildung 156).

Die Abnahme der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei Durchmessern kleiner 30 mm, ist auf ein ungünstiges Verhältnis aus Bolzendurchmesser d und wirksamer Bolzenlänge t zurückzuführen. Insbesondere für die Durchmesser $d = 8 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$ zeigten sich bei der Versuchsdurchführung starke elastische wie auch plastische Verformungen des Verbindungsmittels, die zu einer ungleichmäßigen Belastung der Lochleibung in Z-Richtung führten und damit zu einem vorzeitigen Versagen. In Abbildung 157, S. 158 ist mit einer roten Linie die Lochleibungsfestigkeit von nativen Nadelholz C24, die sich mittels der in DIN EN 1995-1 (2010, S. 78) aufgeführten Formel ableiten lässt, von 8 mm bis 30 mm aufgetragen ($a_3 = 7 \times d$, min 80 mm). Die Abnahme der bezogenen Lochleibungsfestigkeit mit Zunahme des Verbindungsmitteldurchmessers in KP ist prinzipiell vergleichbar mit der Abnahme der Lochleibungsfestigkeit mit Zunahme des Verbindungsmitteldurchmessers an nativem Holz. Für Verbindungsmitteldurchmesser von 10 mm – 60 mm liegt die charakteristische bezogene Lochleibungsfestigkeit in KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q, die unter einem Randabstand von $a_3 = 2,5 \times d$ ermittelt werden konnte ca. **4,1- bis 7-fach** über der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit von Nadelholz C24 (vgl. Tabelle 32 im Anhang, S. A-3).

⁵² vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.2, S. A-37

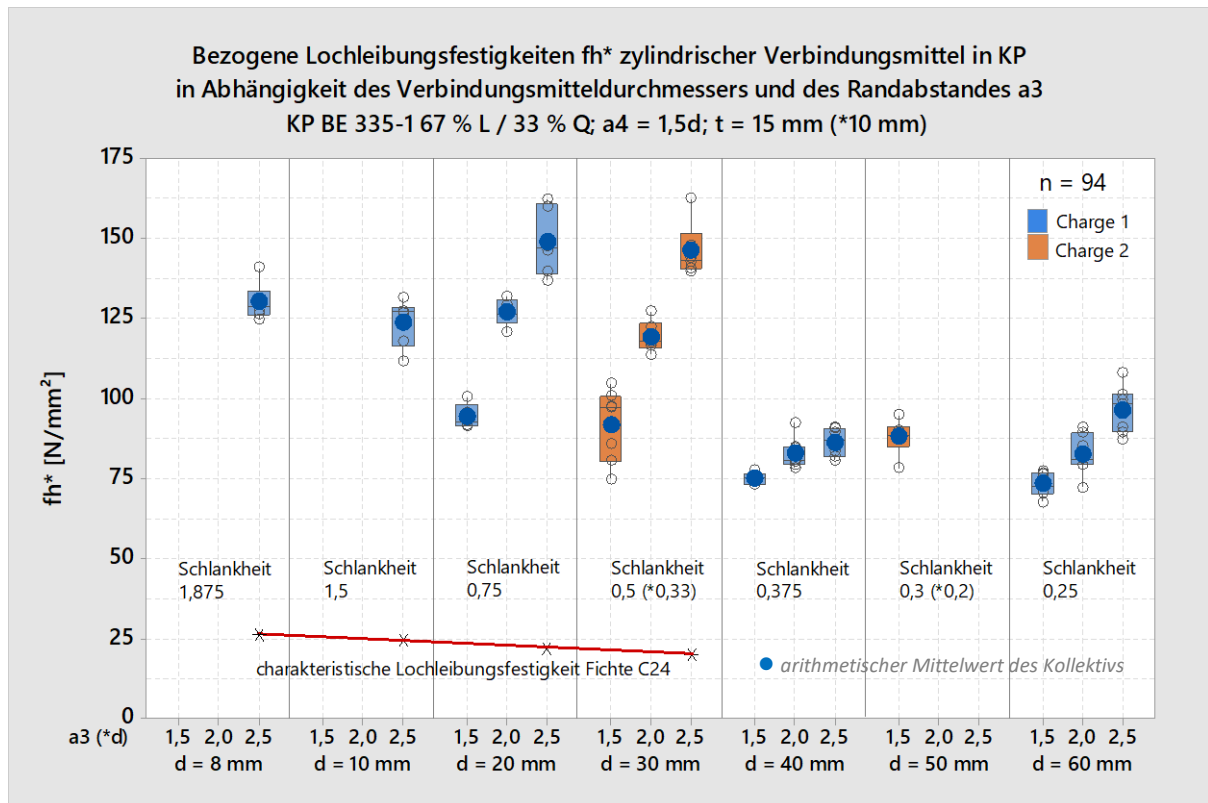


Abbildung 156: Bezogene Lochleibungsfestigkeit f_h^*

Für Verbindungsmittel mit einem Durchmesser von $d = 20 \text{ mm}$ bis $d = 60 \text{ mm}$ kann aus dem Datensatz die nachfolgende Regressionsgleichung zur Bestimmung der bezogenen Lochleibungsfestigkeit (für $a_4 = 1,5d$ und $1,5d \leq a_3 \leq 2,5d$) abgeleitet werden:

$$f_h^* = 191,7 - 8,57 \times d + 2,358 \times a_3 + 0,1084 \times d^2 - 0,03695 \times d \times a_3 \quad R\text{-Qd} = 70,9$$

f_h^* in $[\text{N/mm}^2]$; d in $[\text{mm}]$; a_3 in $[\text{mm}]$

Bruchbildanalyse

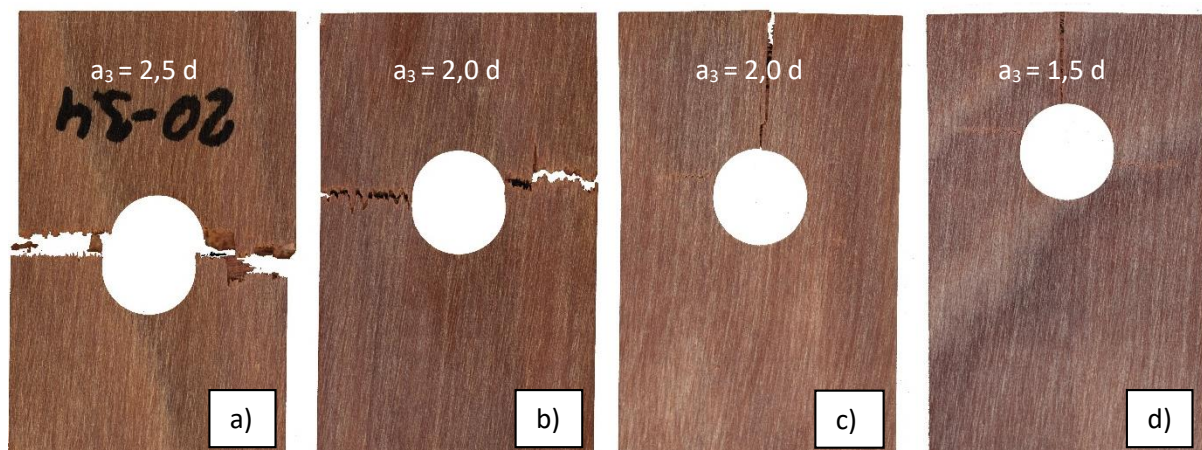


Abbildung 157: Bruchbilder nach Prüfung von Bolzen mit $d = 20 \text{ mm}$

Die Prüfkörper wiesen nach dem Erreichen der Höchstlast zwei verschiedene Bruchbilder auf, die in unmittelbarem Zusammenhang der Vorholzlänge a_3 stehen. Ist der Randabstand a_3 ausreichend groß gewählt, tritt das Versagen im Nettoquerschnitt ein (vgl. Abbildung 157 a), S. 158). Wird ein kritischer Randabstand unterschritten, spaltet das Vorholz auf (vgl. Abbildung 157 c), S. 158).

Es konnten ferner keine ausgeprägten elastischen als auch plastische Verformungen der Lochleibung beobachtet werden. Der Bruch tritt als Spröbruch plötzlich und ohne Ankündigung ein.

Innerhalb der Versuchsreihen hat sich gezeigt, dass der kritische Randabstand a_3 vom Verbindungsmitteldurchmesser abhängt. Bei kleineren Durchmessern muss das Verhältnis aus Randabstand a_3 und Bolzendurchmesser d größer sein als bei großen Durchmessern, damit ein Aufspalten des Vorholzes ausgeschlossen werden kann.

Tabelle 15 gibt das Verhältnis aus Vorholzbrüchen (Spaltbruch) zu Brüchen im Nettoquerschnitt wieder:

Tabelle 15: Dokumentation der Vorholzbrüche

Randabstand	Durchmesser d in [mm]									
	8	10	20	30	40	50	60	8*	40*	60*
2,5 x d	0%	0%	0%	0%	0%	-	0%	0%	-	-
2,0 x d	-	-	80%	100%	0%	-	0%	-	-	-
1,5 x d	-	-	100%	100%	33%	33%	0%	-	0%	0%

Furnierorientierung 67 % L / 33 % Q

* Furnierorientierung 50 % L / 50 % Q

Bei einem Randabstand von 2,5 x d spaltete sich das Vorholz bei keinem der geprüften Durchmesser auf. Ab einem Durchmesser von 40 mm reichte ein Randabstand von 2,0 x d aus, um ein Vorholzaufspalten zu verhindern. Ab 60 mm konnte der Randabstand auf 1,5 x d reduziert werden, um das Aufspalten zu verhindern.

Vergleichsfestigkeit

Für den Einsatz von KP zur Verstärkung am Stabende ist es wichtig, dass die Tragkraft des Stabkopfes größer als die des ungeschwächten Stabes ist. Aus diesem Grund macht es Sinn, nicht die eigentliche (bezogene) Lochleibungsfestigkeit darzustellen, sondern die *Vergleichsfestigkeit*, also die Festigkeit, die beim Versagen des KP-Kopfes im Bruttoquerschnitt erreicht werden konnte. In Abbildung 158, S. 160 sind die Versuchsergebnisse aus Abbildung 156 als Vergleichsfestigkeiten - was dem Quotient aus der Bruchlast $F_{Bruchlast}$ und der Bruttoquerschnittsfläche $A_{Bruttoquerschnitt}$:

$$f_{vgl.} = \frac{F_{Bruchlast}}{A_{Bruttoquerschnitt}}$$

entspricht - aufgeführt.

Es zeigte sich, dass die ermittelten Vergleichsfestigkeiten von Durchmesser $d = 8$ mm bis Durchmesser $d = 60$ mm unter der Einhaltung eines minimalen Randabstandes von a_3 von 1,5 x d, oberhalb der charakteristischen Festigkeiten von nativem Nadelholz C24, C30 und C35 liegen. Dies bedeutet, dass selbst ein Aufspalten des KPs bei Erreichen der Stabfestigkeit prinzipiell zugelassen werden kann und nicht durch große Randabstände ausgeschlossen werden muss. Obwohl mit Zunahme des Verbindungsmitteldurchmessers der kritische Randabstand sinkt und damit ein Aufspalten selbst bei gerin-

gen Randabständen nicht eintritt, wirkt sich ein größerer Randabstand dennoch vorteilhaft auf die bezogene Lochleibungsfestigkeit aus. So zeigte sich beispielsweise eine Steigerung der mittleren bezogenen Lochleibungsfestigkeit um 31 % bei einem Randabstand von $a_3 = 2,5 \times d$ gegenüber einem Randabstand von nur $a_3 = 1,5 \times d$ an einem Verbindungsmitteldurchmesser von $d = 60 \text{ mm}$, obwohl der Bruch bei allen Prüfungen ausschließlich im Nettoquerschnitt auftrat (vgl. Abbildung 159, S. 161).

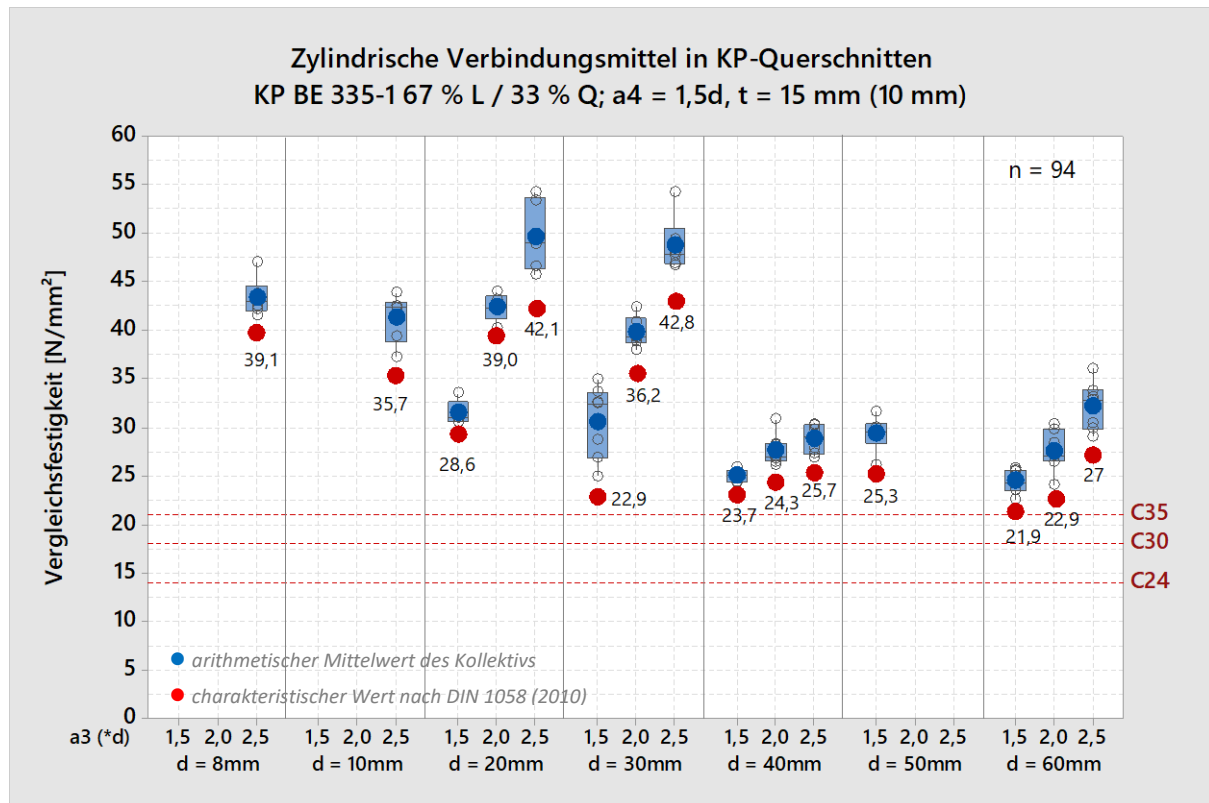


Abbildung 158: Vergleichsfestigkeiten

5.6.2.2 Auswirkung des Plattenaufbaus auf die bezogene Lochleibungsfestigkeit ⁵³

Für die Durchmesser $d = 40 \text{ mm}$ und $d = 60 \text{ mm}$ wurden die bezogenen Lochleibungsfestigkeiten in KP BE 335-1 mit gleichmäßiger Verteilung der Furniere in Längs- und in Querrichtung (50 % L / 50 % Q) bestimmt. Der Randabstand a_3 betrug $1,5 \times d$.

Obwohl die Längszugfestigkeit bei einem Schichtaufbau von 50 % L / 50 % Q um ca. 1/3 geringer im Vergleich zu einem Schichtaufbau von 67 % L / 33 % Q ausfallen (vgl. Kap. 3.4, Tabelle 5, S. 50), zeigten sich dennoch hohe bezogene Lochleibungsfestigkeiten bei gleichen Anteilen in Furnierlängs- als auch in Furnierquerrichtung. In Abbildung 159, S. 161 ist zu erkennen, dass bei einem Randabstand von $a_3 = 1,5 \times d$ sogar eine Steigerung der bezogenen Lochleibungsfestigkeit um ca. 10 % dokumentiert werden konnte. Bei einem Schichtaufbau von 50 % L / 50 % Q entsprach der Mittelwert der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei einem Randabstand von $a_3 = 1,5 \times d$ dem Mittelwert der bezogenen Lochleibungsfestigkeit bei einem Schichtaufbau von 67 % L / 33 % Q und einem Randabstand von $a_3 = 2,0 \times d$.

⁵³ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.2, S. A-37

Wie in Kap. 3.6.2, S. 54 f. beschrieben wurde, versagen in KP unter einer Zugbeanspruchung zunächst die Querlagen, was sich als plastische Verformung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm widerspiegelt. Bei einem Furnieraufbau von 50 % L / 50 % Q ist der Anteil der Querfurniere und damit die *plastische Reserve* größer als bei einem Furnieraufbau von 67 % L / 33 % Q. Aus diesem Grund liegt die Vermutung nahe, dass mit steigendem Anteil an Furnierquerlagen eine Steigerung der *Materialplastizität* (s. dazu auch Kap. 3.6.2, S. 55) einhergeht. Dadurch können Spannungsspitzen im Bereich von Kerben (Bohrungen) besser abgebaut werden als es bei Plattenaufbauten mit geringem Anteil an Querlagen der Fall ist.

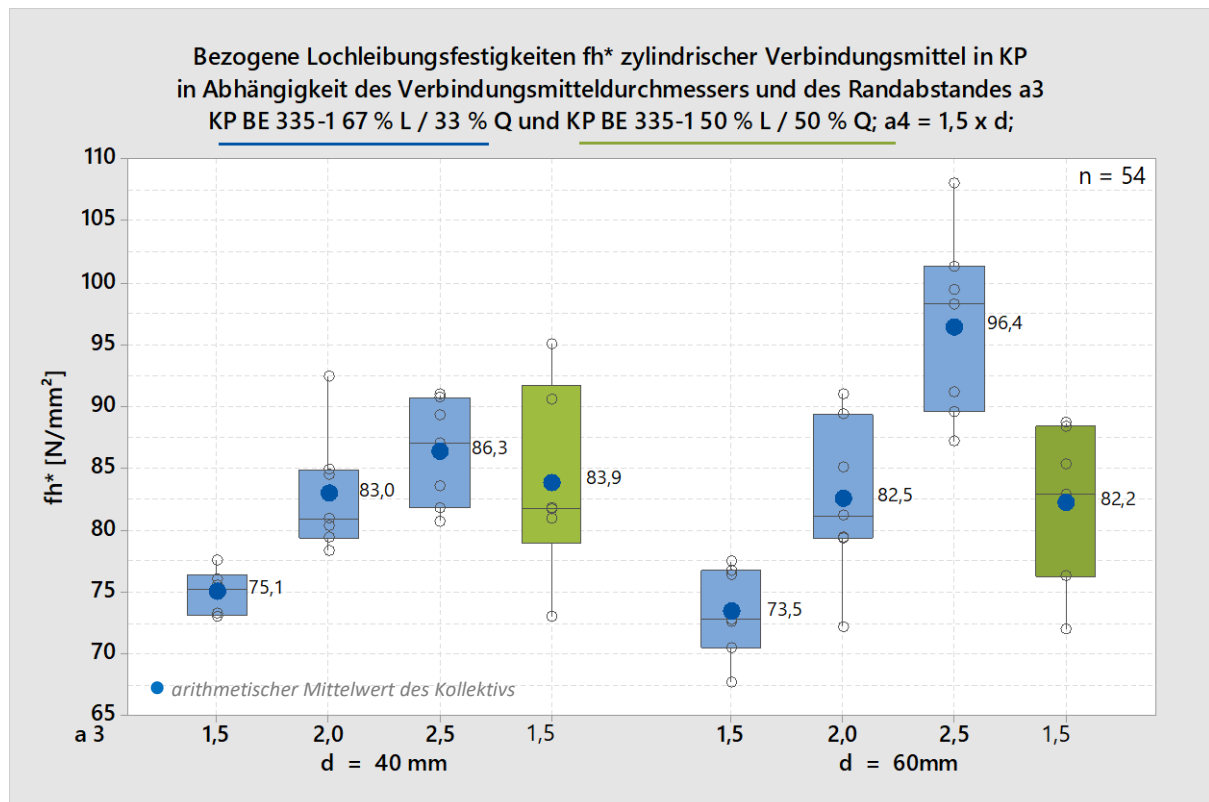


Abbildung 159: Bezogene Lochleibungsfestigkeiten in Abhängigkeit der Furnierausrichtung

5.6.2.3 Auswirkung der Beschaffenheit der Manteloberfläche des Verbindungsmittels auf die bezogene Lochleibungsfestigkeit ⁵⁴

Neben glatten Bolzen wurden auch hochfeste Schrauben mit Gewindegang als Verbindungsmittel geprüft. Der Einfluss des Gewindegangs auf das Tragverhalten der Lochleibung wurde an Verbindungsmitteln mit einem Durchmesser von $d = 8$ mm in KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q quantifiziert. Verglichen wurde die bezogene Lochleibungsfestigkeit unter Verwendung eines glatten Bolzens mit der bezogenen Lochleibungsfestigkeit unter Verwendung einer 8 mm Schraube mit metrischem Gewinde bei Randabständen von $a_4 = 1,5 \times d$ und $a_3 = 2,5 \times d$.

Die Auswertung der Daten zeigt klar, dass die Lochleibungsfestigkeit nur unwesentlich durch das Gewinde beeinflusst wird, da sowohl die Lage des Mittelwertes als auch die Streuung der Ergebnisse um den Mittelwert in beiden Fällen vergleichbar ist (vgl. Abbildung 160, S. 162). Dementsprechend können

⁵⁴ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.3, S. A-39

für den Einsatz metrischer Schrauben in KP-Lochleibungsanschlüssen die gleichen Lochleibungsfestigkeiten angesetzt werden wie die glattschaftiger Verbindungsmittel.

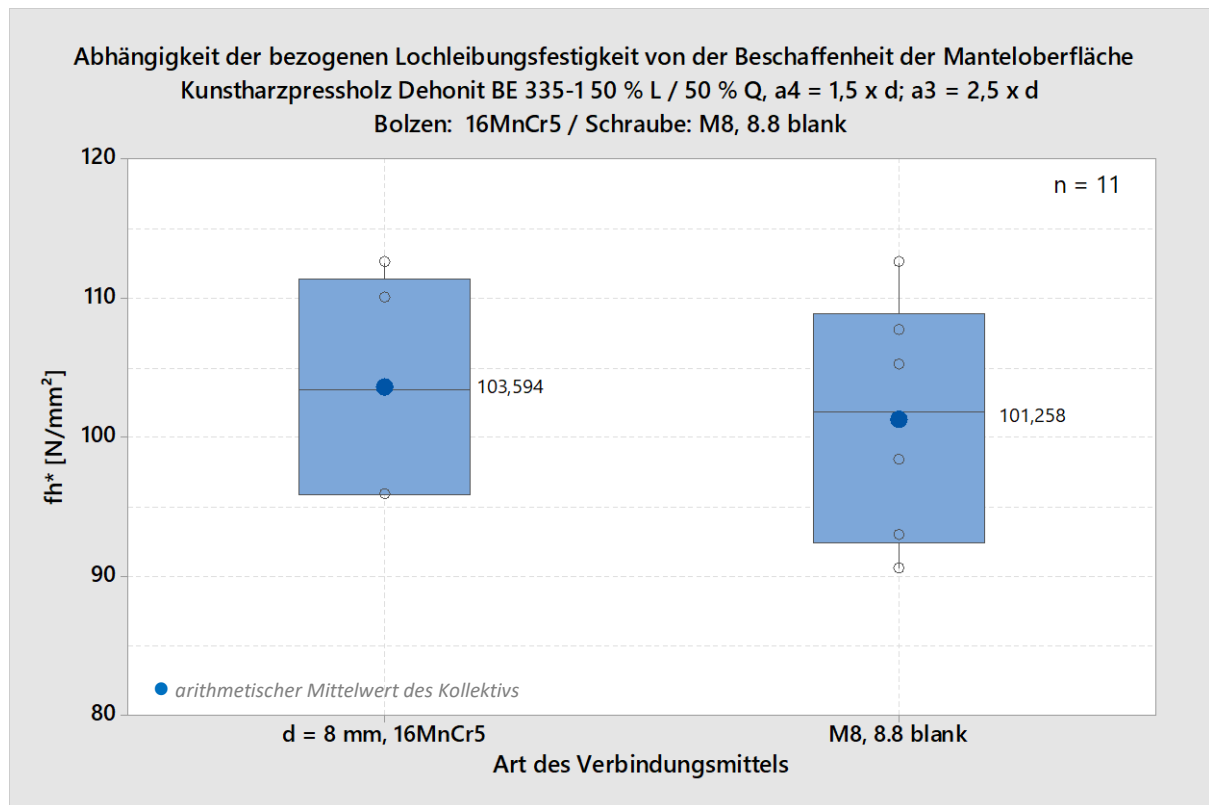


Abbildung 160: Abhängigkeit der bezogenen Lochleibungsfestigkeit von der Beschaffenheit der Manteloberfläche

5.6.2.4 Auswirkung der Verbindungsmittelschlankheit auf die bezogene Lochleibungsfestigkeit in KP ⁵⁵

Für die Stäbe mit verstärkten Stabenden wurden im Vorfeld die geometrischen Verhältnisse (s. Kap. 5.2) festgelegt. Dabei entspricht die Stabbreite b dem dreifachen und die Stabdicke t dem anderthalbfachen Verbindungsmitteldurchmesser. Für die Holz-Stahlblechverbindung mit zentralem Knotenblech lässt sich demnach ein Schlankheitsgrad λ von $t/d = 1,5 \times d/d = 1,5$ für alle Bolzendurchmesser ableiten. Trayer (1932, S. 9) konnte an Harthölzern bis zu einem Schlankheitsgrad von $\lambda = 2,5$ und bei Weichhölzern (Trayer, 1932, S. 14), je nach Holzart bis zu einem Schlankheitsgrad von $\lambda = 3,5 - 4,5$ keinen Einfluss der Bolzenschlankheit auf die Tragfähigkeit nachweisen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss des Schlankheitsgrades auf die Tragfähigkeit von zylindrischen Verbindungsmitteln in KP bestimmt, da aufgrund der hohen Lochleibungsfestigkeiten auch bei geringen Schlankheiten von größeren elastischen als auch plastischen Verformungen der Verbindungsmittel und damit mit einer ungleichmäßigen Beanspruchung der Lochleibung auszugehen ist.

Bei einer Bolzenschlankheit von $\lambda = 1,25$ zeigte sich mit 4 % noch kein signifikanter Abfall der Vergleichsfestigkeit gegenüber den Ergebnissen an zweiseitig gelagerten Schrauben. Bei einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ lag der Abfall bei 37 %, bei einem Schlankheitsgrad von $\lambda = 3,75$ bei 58 % (vgl. Abbildung 161 & Abbildung 162, S. 163).

⁵⁵ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.4, S. A-39

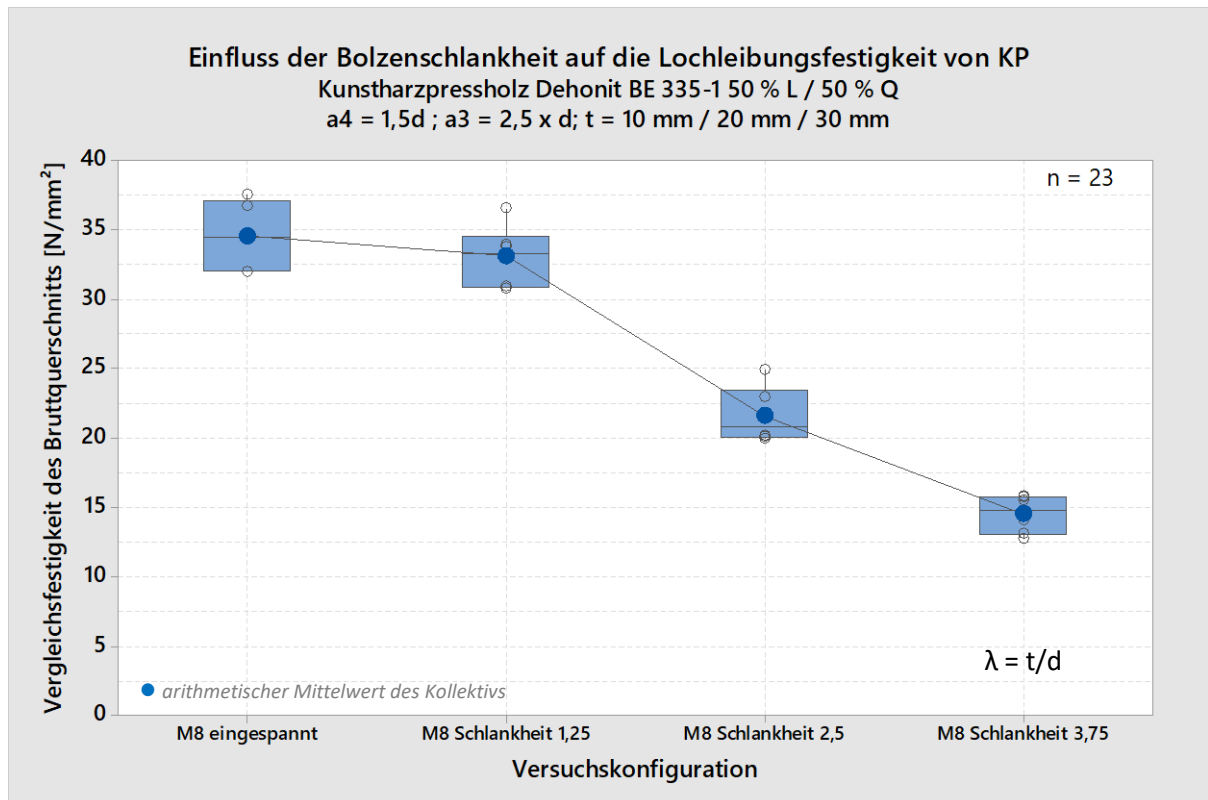


Abbildung 161: Einfluss der Bolzenschlankheit auf die Lochleibungsfestigkeit von KP

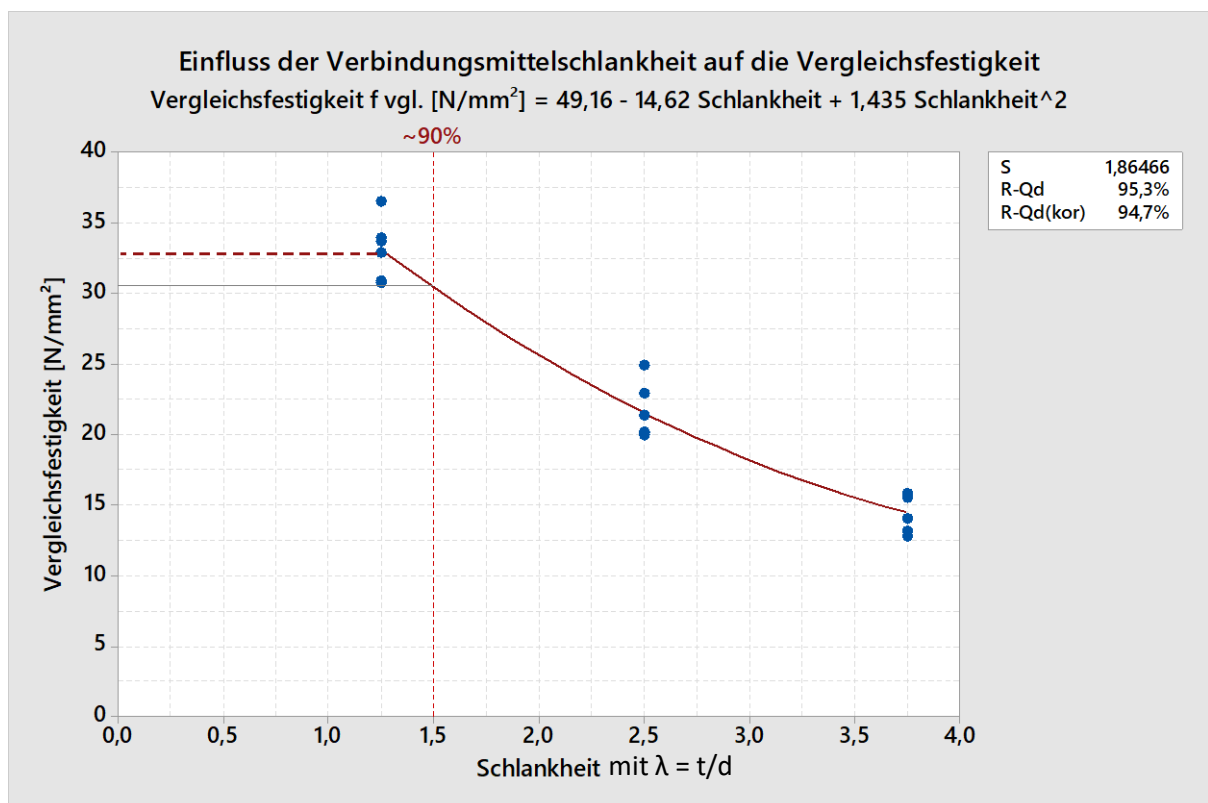


Abbildung 162: Einfluss der Verbindungsmittelschlankheit auf die Vergleichsfestigkeit

Aus dem Datenmaterial konnte nachfolgendes Regressionsmodell zum Einfluss der Bolzenschlankheit entwickelt werden:

$$f_{vgl.} \left[\frac{N}{mm} \right] = 49,16 - 14,62 \times \lambda + 1,435 \times \lambda^2 \text{ mit R-Qd} = 95,3 \%$$

Für eine Bolzenschlankheit von $\lambda = 1,5$ kann ein Abfall der Vergleichsfestigkeit von ca. 10 % berechnet werden.

Grenzen des Regressionsmodells

Das Regressionsmodell geht zum einen davon aus, dass bei einer Bolzenschlankheit von $\lambda = 1,25$ gerade das Fließen des Bolzens beginnt. Zum anderen wird die Auswirkung durch elastische Verformungen unter einem Schlankheitsgrad von $\lambda = 1,25$ vernachlässigt. Neben dem Schlankheitsgrad bestimmt zudem die Lochleibungsfestigkeit und die Festigkeit des Verbindungsmittels den Zeitpunkt des Plastifizierens. Je höher die Lochleibungsfestigkeit dabei ist, desto geringer ist der Grenzschlankheitsgrad; je höher die Verbindungsmittelfestigkeit dabei ist, desto höher ist der Grenzschlankheitsgrad.

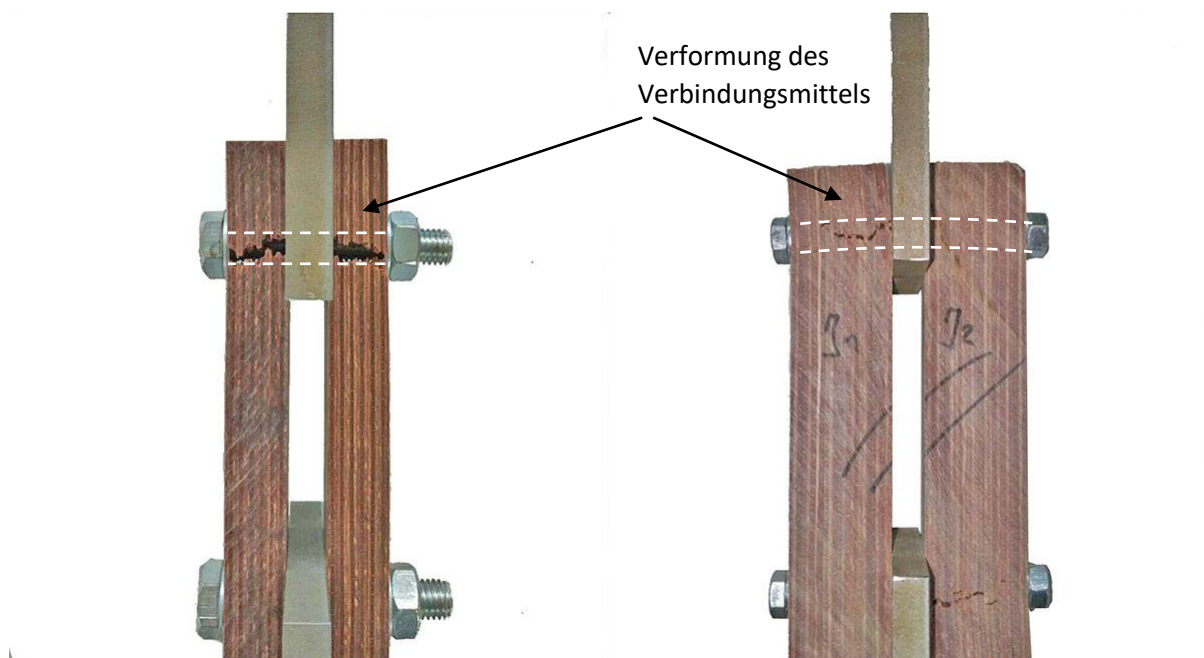


Abbildung 163: Bruchbilder an Zangenanschlüssen von KP-Querschnitten, links $\lambda = 1,25$; rechts $\lambda = 3,75$

Bei den Zangenanschlüssen mit einer Schlankheit von $\lambda = 2,5$ und $\lambda = 3,75$ zeigte sich deutlich, dass der Bruch jeweils in einer der Scherflächen zwischen KP und der Stahlplatte ausgelöst wird und sich von dort in die Tiefe der KP-Querschnitte fortführt. Am Verbindungsmittel bildete sich ein zentrales Fließgelenk aus (vgl. Abbildung 163). Das Bruchbild und das Verformungsbild des Verbindungsmittels zeigen klar, dass es bei großen Schlankheitsgraden zu einer ungleichmäßigen Beanspruchung der Lochleibung kommt. Daraus resultiert ein frühzeitiges Versagen des Querschnitts. Die ungleichmäßige Spannungsverteilung kann den Simulationsstudien in Kap. 6.1.1, S. 172 entnommen werden.

5.6.3 Anwendung der Johansen-Gleichungen ⁵⁶

Die Johansen-Gleichungen berücksichtigen bei der Ermittlung der Tragfähigkeit die plastische Verformung des Verbindungsmittels, indem neben der reinen Lochleibungsfestigkeit auch die Ausbildung von ein oder mehreren Fließgelenken betrachtet wird. Nachfolgend wird die Anwendbarkeit der Johansen-Gleichungen bei der Verwendung von KP überprüft. Dazu werden die Traglasten für einen Anschluss mit einem stiftförmigen Verbindungsmittel mit $d = 8 \text{ mm}$ für unterschiedliche Verbindungsmittelschlankheiten mit den entsprechenden Johansen-Gleichungen berechnet. Die Bestimmung der Traglasten erfolgt mit Zugversuchen. Die Ergebnisse aus den Berechnungen mit den Johansen-Gleichungen werden dann mit den Ergebnissen der Zugversuche verglichen.

Anstatt der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit $f_{h,1,k}$ wird in der Gleichung für zweischnittige Verbindungen mit mittlerem Stahlblech (s. S. 142) hier die charakteristische bezogene Lochleibungsfestigkeit $f_{h,1,k}^*$ angesetzt:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \quad \text{(I)} \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{(II)} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad \text{(III)} \end{array} \right.$$

- $F_{v,Rk}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel
 $f_{h,1,k}^*$ charakteristischer Wert der bezogenen Lochleibungsfestigkeit
 ➤ für KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q = **82,6 N/mm²** (vgl. Tabelle 32, im Anhang. S. 3)
 t_1 Stärke der Seitenhölzer
 d Durchmesser des Verbindungsmittels
 $M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmoments des Verbindungsmittels
 ➤ mit $M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6}$ mit Flankendurchmesser **$d_2 = 7,2 \text{ mm (M8)}$**
 $F_{ax,Rk}$ charakteristischer Wert des Auszieh Widerstands des Verbindungsmittels; hier: **0**
 $f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit

Tabelle 16: Vergleich der Ergebnisse der charakteristischen Tragfähigkeiten F_k an Anschlüssen mit Gewindeschrauben M8, 8.8 nach der Johansen-Gleichungen mit den Ergebnissen der Versuchsreihen

Stärke	Schlankheit	Tragfähigkeit nach Johansen	maßgebende Gleichung	Tragfähigkeit nach Prüfreihe	Abweichung von Johansen – Glg.
t [mm]		F_k [kN]			
10	1,25	12,4	I	13,66	10%
20	2,5	16,2	II	16,76	4%
30	3,75	19,5	II	16,68	-14%

Tabelle 16 zeigt, dass die charakteristische Tragfähigkeit F_k von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmittel in KP gut mit den Johansen-Gleichungen abgeschätzt werden kann.

⁵⁶ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.5.1.4, S. A-39

Die Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses berechnet sich dann mit:

$$F_{Rd} = \sum F_{v,Rk} \times \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$$

F_{Rd}	Bemessungswert der Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft, unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten und von geometrischen Abweichungen
k_{mod}	Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt

In DIN EN 1995-1-1/NA (2013, S. 18) ist der Teilsicherheitsbeiwert γ_M für Holz und Holzwerkstoffe mit 1,3 und der Teilsicherheitsbeiwert für metallische stiftförmige Verbindungsmittel ebenfalls mit 1,3 festgelegt.

Für den Standardfall Nutzungsklasse 1, Klasse der Lasteinflussdauer „mittel“, liegt der Modifikationsbeiwert für Holz und Holzwerkstoffe (u. a. Sperrholz, Furnierschichtholz) - zu denen im weiteren Sinn auch KP zu zählen sind - bei $k_{mod} = 0,8$.

Tabelle 17: Vergleichsfestigkeit des verstärkten Anschlussbereiches bei $a_3 = 1,5 \times d$; und $t = 1,5 \times d$

BE 335-1 67%L/33%Q			BE 335-1 50%L/50%Q		
d	a_4	$f_{vgl.,k}$ [N/mm ²]	d	a_4	$f_{vgl.,k}$ [N/mm ²]
8	2,5	39,1	8	1,5	28,6
10	2,5	35,7	40	1,5	22,4
20	1,5	28,6	60	1,5	23,0
	2,0	39,0			
	2,5	42,1			
30	1,5	22,9			
	2,0	36,2			
	2,5	42,8			
40	1,5	23,7			
	2,0	24,3			
	2,5	25,7			
50	1,5	25,3			
60	1,5	21,9			
	2,0	22,9			
	2,5	27,0			

Festigkeitsklasse	$f_{t,k}$ [N/mm ²]
C24	14
C30	18
C35	21

5.7 Lochleibungsversuche im Maßstab 1:1 ⁵⁷

Für Bolzen mit $d = 40 \text{ mm}$ in KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurde für die Randabstände $a_3 = 2,5 \times d$ und $a_4 = 1,5 \times d$ eine mittlere bezogene Lochleibungsfestigkeit $f_{h,mean}$ von $86,3 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Für eine zweischnittige Verbindung mit mittigem Stahlblech und Seitenhölzern mit $b = 120 \text{ mm}$ und $t = 60 \text{ mm}$, sollten dann unter Berücksichtigung des Lastabfalls von 10 % infolge der Bolzenschlankheit von $\lambda = 1,5$, die nachfolgende mittlere Traglast F_{mean} erreicht werden:

$$F_{max} [kN] = f_{h,mean} \times t \times d \times k_{\lambda} \times 2$$

k_{λ} Korrekturfaktor infolge des Einfluss der Bolzenschlankheit, vgl. Abbildung 162, S. 163

$$F_{mean} [kN] = 86,3 \frac{N}{mm^2} \times 60mm \times 40mm \times 0,9 \times 2 = \mathbf{372 \text{ kN}}$$

Die charakteristische Tragfähigkeit kann über die Johansen-Gleichungen nach S. 165 bestimmt werden:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} 77,1 \frac{N}{mm^2} \times 60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \quad (I) \\ 77,1 \frac{N}{mm^2} \times 60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times 3.512.103}{77,1 \frac{N}{mm^2} \times (60 \text{ mm})^2 \times 40 \text{ mm}}} - 1 \right] + 0 \quad (II) \\ 2,3 \times \sqrt{3.512.103 \times 77,1 \frac{N}{mm^2} \times 40 \text{ mm} + 0} \quad (III) \end{array} \right.$$

$f_{h,1,k}^*$ 77,1 N/mm² (vgl. Tabelle 32, S. A-3 im Anhang)

t_1 60 mm

d 40 mm

$M_{y,Rk}$ 3.512.103

$F_{ax,Rk}$ 0

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (s. A-38 im Anhang)

Die charakteristische Tragfähigkeit des Stabpaares berechnet sich zu:

$$F_k = 2 \times F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} \text{Gleichung I} = 370 \\ \text{Gleichung II} = 299 \rightarrow \mathbf{299 \text{ kN}} \\ \text{Gleichung III} = 479 \end{array} \right.$$

⁵⁷ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.7, S. A-44

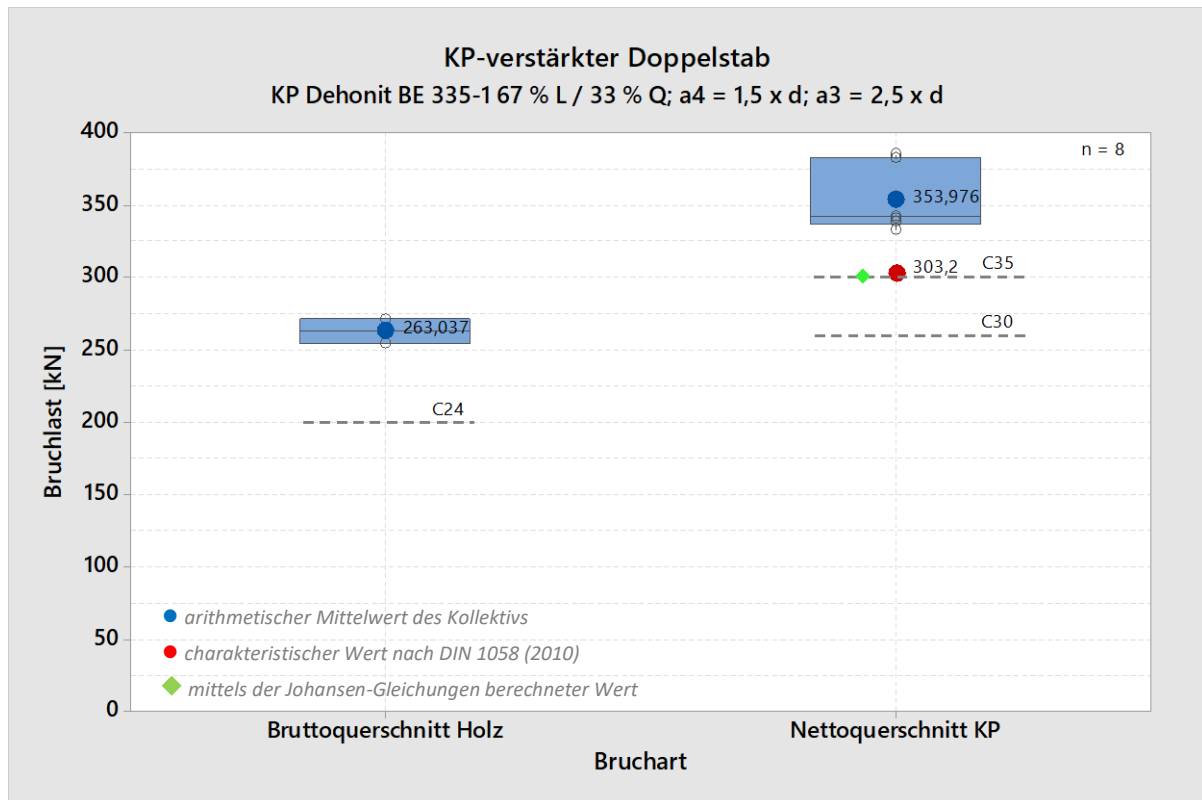


Abbildung 164: Ergebnisse aus Bauteilversuchen an mit KP verstärkten Doppelstäben mit mittigem Stahlblech

Insgesamt wurden 8 Versuche in realer Bauteilgröße durchgeführt. Für die Versuche 7 und 8 wurden intakte Stäbe aus den 6 Versuchen zuvor wiederverwendet, s. (Protokoll). An den geprüften Querschnitten zeigten sich zwei unterschiedliche Bruchbilder. Es konnten sowohl Brüche im ungeschwächten Bruttoquerschnitt des nativen Holzes (vgl. Abbildung 164 und Abbildung 165, jeweils links) als auch Brüche im Nettoquerschnitt des verstärkten Stabendes (vgl. Abbildung 165, S. 169) dokumentiert werden. An allen Prüfkörpern blieb die Keilzinkenverbindung intakt. Im Kraft-Weg-Diagramm (vgl. Abbildung 166, S. 169) stellte sich ein lineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten dar. Der Bruch trat spontan, ohne Ankündigung ein. Die Holzbrüche konnten nur an S10 sortierten Querschnitten dokumentiert werden. Eine Übersicht über die erzielten Bruchlasten, die Art des Bruches und über die Einstufung in die Sortierklassen zeigt Tabelle 18, S. 170.

Der Mittelwert der Tragfähigkeit der Doppelstäbe, deren Bruch durch Versagen des Bauteilanschlusses eintrat, lag mit 354 kN ca. 5 % unterhalb der mittels der Gleichung berechneten Tragfähigkeit von 372 kN. Die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zum Schlankheitsgrad (S. 163 ff.) können demnach auf Bauteilanschlüsse im Maßstab 1:1 übertragen werden.

Die charakteristische Bruchlast der Stichprobe lag bei 303 kN und damit nur 1% über der mittels der Johansen-Gleichungen bestimmten charakteristische Tragfähigkeit von 299 kN. Die Johansen-Gleichung eignet sich demnach sehr gut für die Berechnung der charakteristischen Tragfähigkeit von Anschlüssen mittels stiftförmigen Verbindungsmitteln in KP.

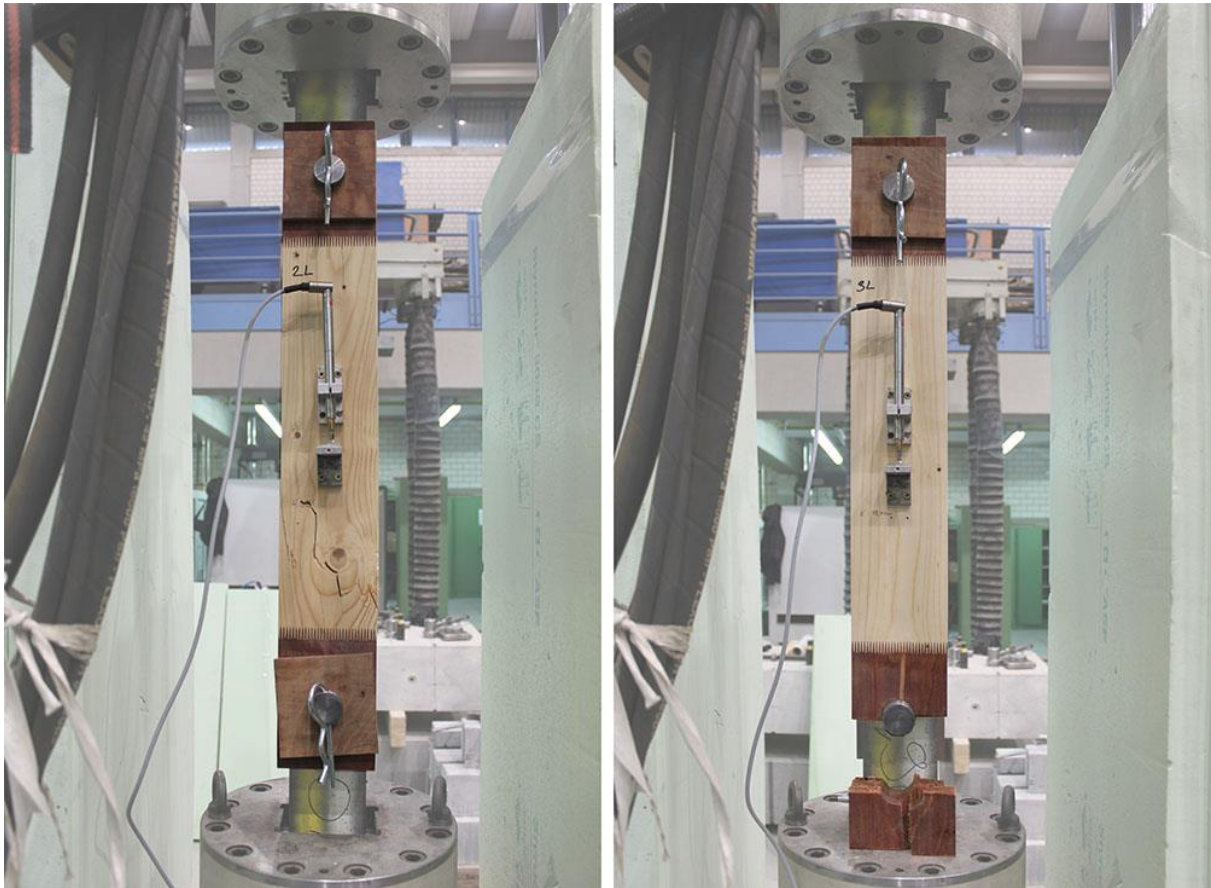


Abbildung 165: Bauteilversuch an einem KP-verstärkten Stabpaar, mit $A = 2 \times (b = 60 \text{ mm}) \times (h = 120 \text{ mm})$

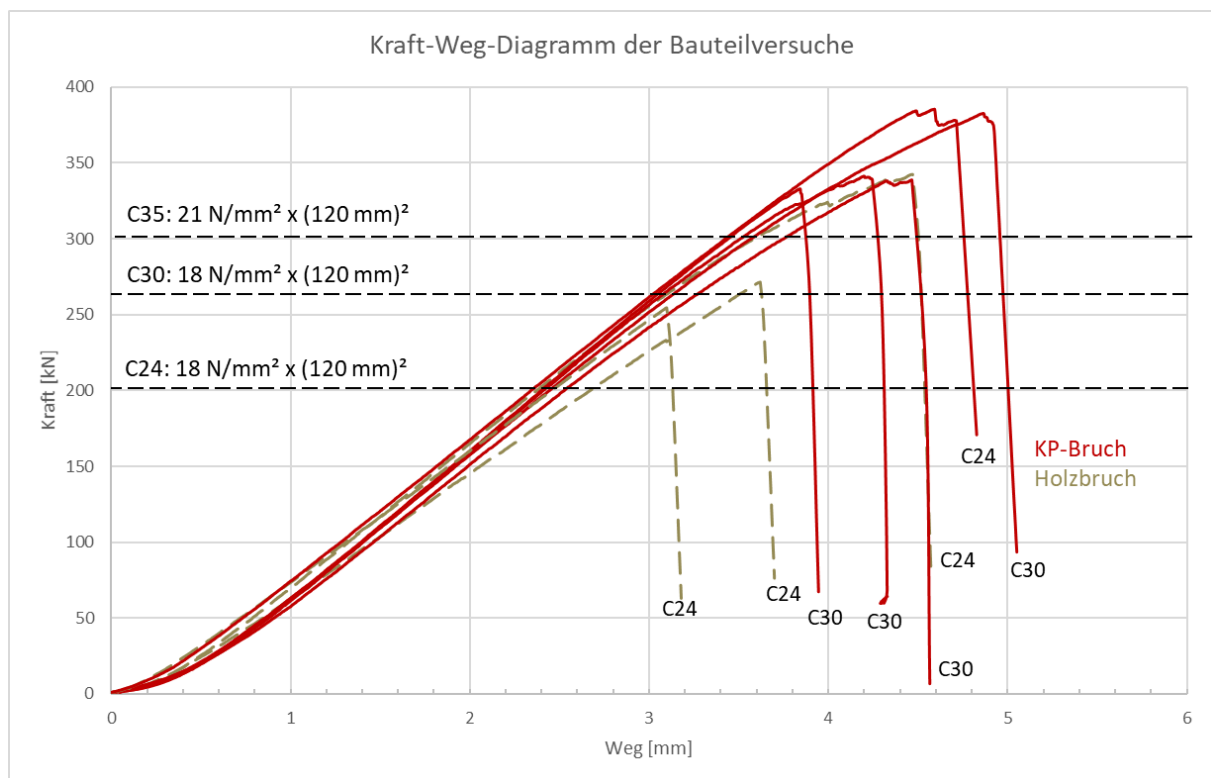


Abbildung 166: Kraft-Weg-Diagramm der Bauteilversuche

Tabelle 18: Tabellarische Übersicht zur Versuchsreihe Bauteilversuch d 40

	Stab 1	SK	FK	$f_{t,0,k}$	Stab 2	SK	FK	$f_{t,0,k}$	Bruchlast [kN]	$\sigma_{\text{Bruttoqs.}} [\text{N/mm}^2]$
1	Holzbruch	S10	C24	14	Teilschädigung	S13	C30	18	342,5	23,8
2	Holzbruch	S10	C24	14	intakt	S10	C24	14	271,5	18,9
3	KP-Bruch	S13	C30	18	intakt	S13	C30	18	341,4	23,7
4	intakt	S13	C30	18	KP-Bruch	S10	C30	18	338,8	23,5
5	KP-Bruch	S10	C30	18	intakt	S13	C30	18	333,0	23,1
6	intakt	S10	C24	14	KP-Bruch	S10	C24	14	382,7	26,6
7	Holzbruch	S10	C24	14	intakt	S13	C30	18	254,6	17,7
8	intakt	S13	C30	18	KP-Bruch	S13	C30	18	385,5	26,8

5.8 Fazit zu den Lochleibungsversuchen

Die Versuche zur Ermittlung der bezogenen Lochleibungsfestigkeit von KP als auch die Versuche zum Tragverhalten des mit KP verstärkten Baueilanschlusses zeigen, dass unter Einhaltung der zuvor definierten Randabstände (von $a_4 = 1,5 \times d$; $a_3 = 2,5 \times d$ und $t = 1,5 \times d$) Bauteilanschlüsse mit mittigem Stahlblech und einem einzigen zylindrischen Verbindungsmittel bis zu einem Durchmesser von $d = 60$ mm und bis zur Festigkeitsklasse C35 möglich sind und dabei die Bemessung der verstärkten Stäbe ausschließlich über den ungeschwächten Bruttoquerschnitt des nativen Holzes erfolgen kann. Bei Schlankheiten von $\lambda > 1,25$ kann der Mittelwert der Tragfähigkeit mit der Regressionsgleichung aus Kap. 5.6.2, S. 163 abgeschätzt werden. Die charakteristische Tragfähigkeit kann für Schlankheiten von $\lambda > 1,25$ mittels der Johansen-Gleichungen bestimmt werden.

In den Zugversuchen sowie in den Druckversuchen zeigte sich eine Abnahme der bezogenen Lochleibungsfestigkeit f_h^* mit Zunahme des Verbindungsmitteldurchmessers d . Die ermittelten Lochleibungsfestigkeiten der Druckversuche lagen dabei um das 1,7-fache bis um das 2,8-fache über den im Zugversuch ermittelten Lochleibungsfestigkeiten. Die bezogenen Lochleibungsfestigkeiten f_h^* , die im Rahmen der Zugprüfungen ermittelt wurde, können demnach neben der Ermittlung der statischen Nachweise für Zugstäbe auch als Mindestwerte für die statischen Nachweise der Druckstäbe angesetzt werden.

Die enormen Unterschiede der bezogenen Lochleibungsfestigkeit f_h^* in Abhängigkeit der Belastungsrichtung (Druck und Zug) und bei gleichem Verbindungsmitteldurchmesser d sind auf den Querschnittsverlust und die Kerbwirkung infolge der Bohrung zurückzuführen. Über alle Versuchsreihen hinweg lag der Querschnittsverlust durch die Bohrung bei 33 %. Der Abfall der bezogenen Lochleibungsfestigkeit im Zugversuch, bezogen auf den Druckversuch, lag mit 41 % - 64 % darüber.

Die auf Zug beanspruchten Lochleibungsproben versagten bei der Unterschreitung des kritischen Randabstandes a_3 durch ein Aufspalten des Vorholzes. Der Bruch wurde dabei durch die Überschreitung der Querkzugfestigkeit am Stabrand ausgelöst und breitete sich bis zur Bohrung aus (vgl. Abbildung 157, S. 158). Wurden die für den jeweiligen Bolzendurchmesser kritischen Randabstände nicht unterschritten, trat der Bruch im Nettoquerschnitt der Probe auf. Der kritische Randabstand ist bezogen auf den Bolzendurchmesser bei kleinen Verbindungsmitteldurchmessern größer als bei großen Verbindungsmitteldurchmessern. Oberhalb des kritischen Randabstandes konnte die Lochleibungsfestigkeit nur geringfügig gesteigert werden.

Die auf Druck beanspruchten Proben versagten allesamt infolge eines Spaltbruchs im Vorholz, der durch die Überschreitung der Querkzugfestigkeit unmittelbar im Bereich der Lochleibung ausgelöst wurde. Der Bruch breitete sich dann von der Bohrung bis zum Stabende hin aus.

Für die Verstärkung nativer Nadelholzstäbe bis Festigkeitsklasse C35 reichen, je nach Schlankheitsgrad und bis zum Verbindungsmitteldurchmesser von $d = 60 \text{ mm}$, bereits Randabstände von $a_3 = a_4 = 1,5 \times d$, um die Tragfähigkeit des Bruttostabquerschnitts für eine statische Berechnung ansetzen zu können. Die Bemessung einer Stabstruktur mit KP-verstärkten Stabenden kann somit für die untersuchten Verbindungsmitteldurchmesser - unter Einhaltung der definierten Geometrieabhängigkeiten und unter Verwendung der beschriebenen Materialien - ausschließlich über die Querschnittsfläche des nativen Stabbruttoquerschnitts erfolgen, ohne dass eine Bemessung des Anschlusses durchzuführen ist. Damit vereinfacht sich der Aufwand, der für die statische Nachweisführung wie auch für die Errichtung der Tragstruktur von Nöten ist, auf ein Minimum.

Auch die Verstärkung von Laubholz der Festigkeitsklassen D40 und D60 ist bei entsprechender Anpassung der Randabstände denkbar. Die entsprechenden Nachweise der Tragfähigkeit des Anschlussbereiches als auch der Tragfähigkeit der Keilzinkenverbindung wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht erbracht.

Da plastische Verformungen der Verbindungsmittel erst deutlich oberhalb der charakteristischen Tragfähigkeit von Hölzern der Festigkeitsklasse C35 eingetreten sind, wurde ferner der Beweis erbracht, dass reversible Verbindungen in KP-verstärkten Stabenden bis Festigkeitsklasse C35 und bis zu einem Schlankheitsgrad der Verbindungsmittel von $\lambda = 1,5$ realisierbar sind.

6 Konstruieren mit KP verstärkten Stäben

6.1 Lochleibungsanschlüsse

6.1.1 Untersuchung verschiedener Anschlussmöglichkeiten

Da sich an kleinen Verbindungsmitteldurchmessern größere bezogene Lochleibungsfestigkeiten f_h^* zeigen als an großen Durchmessern, macht es für den Bauteilanschluss Sinn, statt einem einzigen Verbindungsmittel mit großem Durchmesser mehrere Verbindungsmittel mit kleinem Durchmesser einzusetzen. Bei gleichbleibender Stabstärke t bedeutet eine Reduktion des Verbindungsmitteldurchmessers d jedoch einen Anstieg der Bolzenschlankheit $\lambda = t/d$ und damit höhere lokale Spannungen aufgrund ungleichmäßiger Spannungsverteilung infolge erhöhter elastischer als auch plastischer Verformungen (vgl. Kap. 5.4.8, S. 148), die zu einem vorzeitigem Versagen der Verbindung führen.

Im nachfolgendem Beispiel wird der Spannungsverlauf entlang der Mantelfläche des Verbindungsmittels (vgl. Abbildung 167) und entlang der Lochleibung (vgl. Abbildung 168, S. 173) im elastischen Zustand qualitativ wiedergegeben. Für das Beispiel wird das Stabende mit KP BE 335-1 / 67 % L / 33 % Q verstärkt. In Variante A werden zwei Querschnitte mit $b = 60$ mm, $h = 120$ mm mit einem glattwandigen Stahlbolzen mit $d = 40$ mm; $a_3 = 1,5 \times d$; $a_4 = 1,5 \times d$ (Stahl 16MnCr5) an ein mittiges Stahlblech, $t = 8$ mm (S355) angeschlossen. In Variante B werden die gleichen Querschnitte mit zwei glattwandigen Stahlbolzen mit $d = 20$ mm; $a_3 = 3,0 \times d$; $a_4 = 1,5 \times d$; $a_2 = 3 \times d$ (Stahl 16MnCr5) an ein mittiges Stahlblech, $t = 8$ mm (S355) angeschlossen. In Variante C wird ein Querschnitt mit $b = 120$ mm, $h = 120$ mm mit zwei glattwandigen Stahlbolzen mit $d = 20$ mm; $a_3 = 3,0 \times d$; $a_4 = 1,5 \times d$; $a_2 = 3d$ (Stahl 16MnCr5) an mehrere Stahlbleche, $t = 1,6$ mm (S355) (Greimbauweise) angeschlossen.

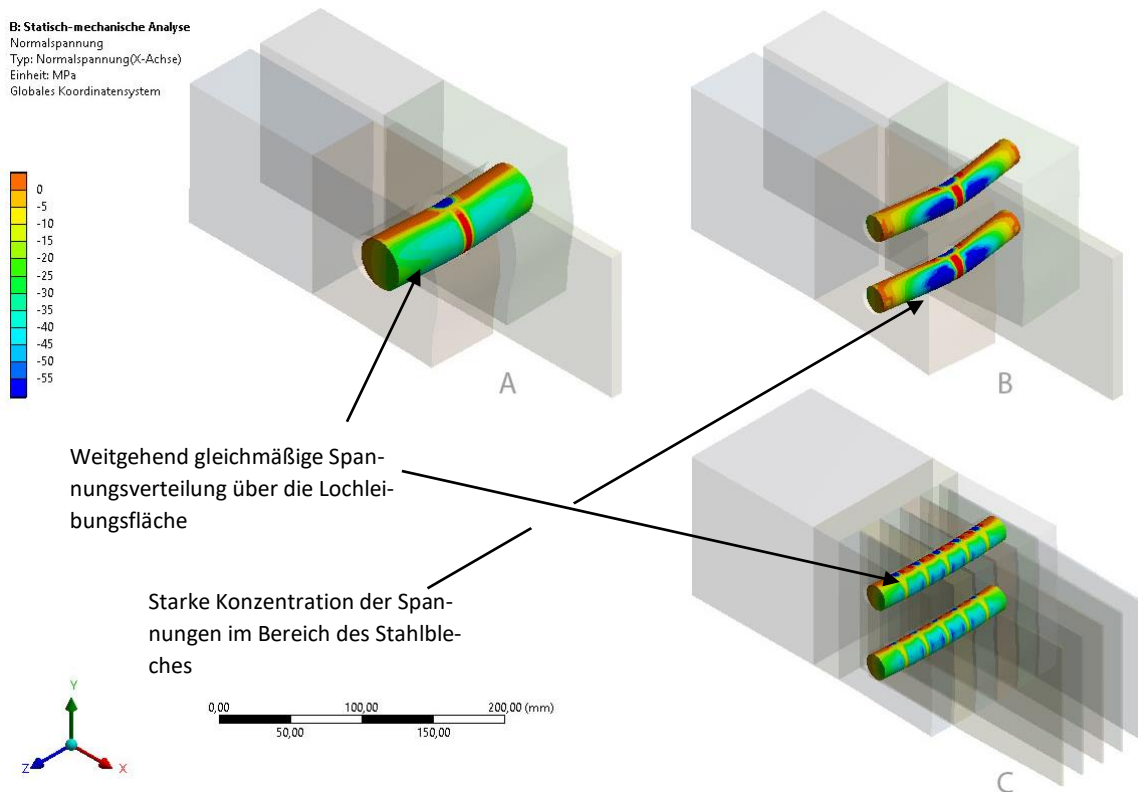


Abbildung 167: Darstellung der Spannungsverteilung auf der Mantelfläche; oben: Stabdübel-Stahlblechanschluss $b \times h = 2 \times 6$ cm x 12 cm, unten: Greimbauweise 12 cm x 12 cm; $d = 20$ mm

Die Simulation der Spannungsverteilung (vgl. Abbildung 167) zeigt die ungleichmäßige Verteilung an schlanken Verbindungsmitteln (B) mit mittigem Stahlblech im Vergleich zu gedrunenen Verbindungsmitteln (A) mit mittigem Stahlblech. Während sich am gedrunenen Verbindungsmittel die Druckspannungen weitgehend homogen über die Mantelfläche verteilen, konzentrieren sie sich am schlanken Verbindungsmittel (B) nahe des Stahlbleches, während die Enden des Verbindungsmittels weitgehend unbeanspruch sind. In Abbildung 167 sind die elastischen Durchbiegungen 30-fach überhöht dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Verbindungsmittel im Anschlusstyp B um ein Vielfaches verformen als im Anschlusstyp A. Um eine gleichmäßigere Spannungsverteilung auch an dünneren Verbindungsmitteln zu erreichen, muss die Verbindungsmittelschlankheit reduziert werden. In (C) sind statt einem einzigen zentralen Knotenblech mehrere dünne Schlitzbleche in den verstärkten Stabkopf eingebracht. Mit jedem Schlitzblech werden zusätzliche Auflager für das Verbindungsmittel erzeugt und die Schlankheit dadurch reduziert. Die Simulation zeigt für (C) eine deutlich homogenere und damit bessere Spannungsverteilung der Druckspannungen über die Mantelfläche.

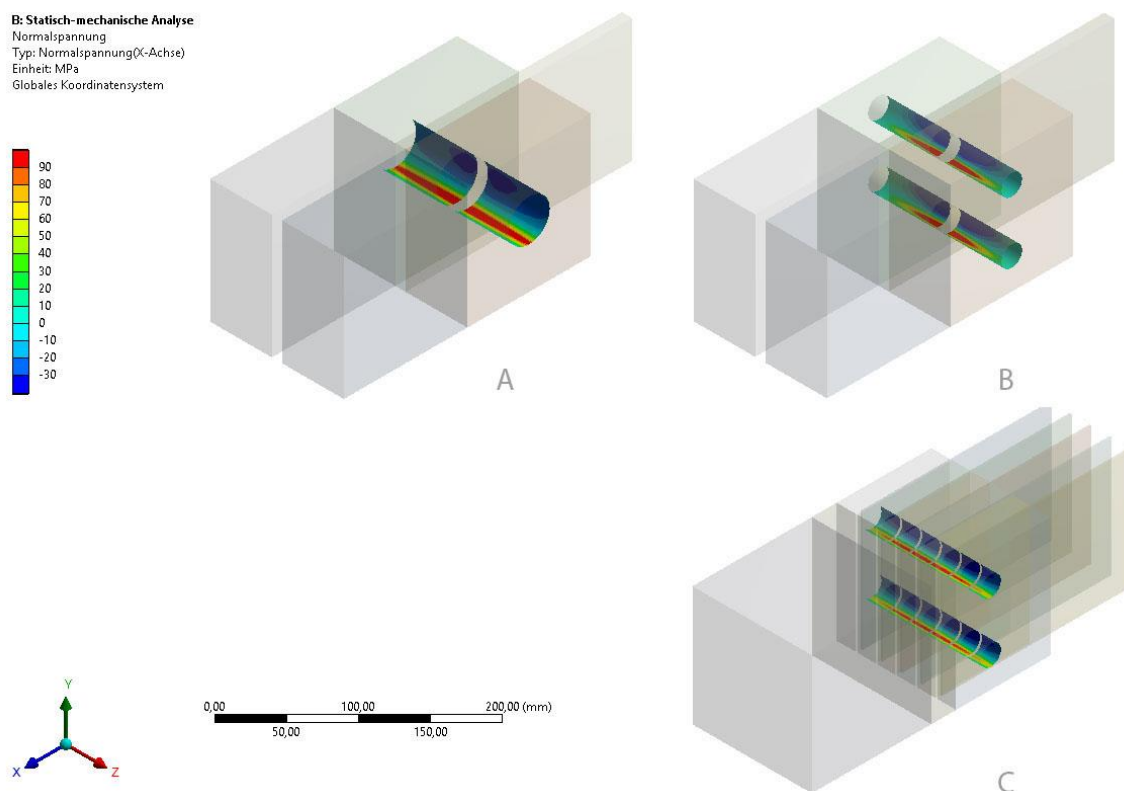


Abbildung 168: Darstellung der Spannungsverteilung in der Lochleibung; oben: Stabdübel-Stahlblechanschluss $b \times h = 2 \times 6$ cm x 12 cm, unten: Greimbauweise 12 cm x 12 cm; $d = 20$ mm.

Die Simulationsergebnisse zeigen neben der ungünstigen Druckspannungsverteilung auf der Mantelfläche schlanker Verbindungsmittel auch eine ungleichmäßigere Druckspannungsverteilung in der Lochleibung im Vorholz als auch einer ungleichmäßigeren und damit ungünstigeren Zugspannungsverteilung im Nettoquerschnitt des Stabanschlusses (vgl. Abbildung 168). Im Nettoquerschnitt konzentrieren sich die Zugspannungen in der Lochleibung ebenfalls nahe des zentralen Stahlbleches. Bei ausreichend großem Randabstand a_3 versagt der Stabanschluss aufgrund der Überschreitung der Zugfestigkeit im Nettoquerschnitt nahe des Stahlbleches (vgl. Abbildung 168). Auch hier zeigt sich, dass mit der Verwendung schlanker Schlitzbleche im Stabende eine gleichmäßigere Verteilung der Zugspannungen im Nettoquerschnitt einstellt und damit höhere Tragfähigkeiten realisierbar sind.

Die Druckspannungsverteilung in X-Richtung im Nettoquerschnitt entlang der Z-Achse sowie die Zugspannungsverteilung in X-Richtung im Nettoquerschnitt entlang der Y-Achse, sind in Abbildung 169 für die drei Anschlusstypen A, B und C dargestellt.

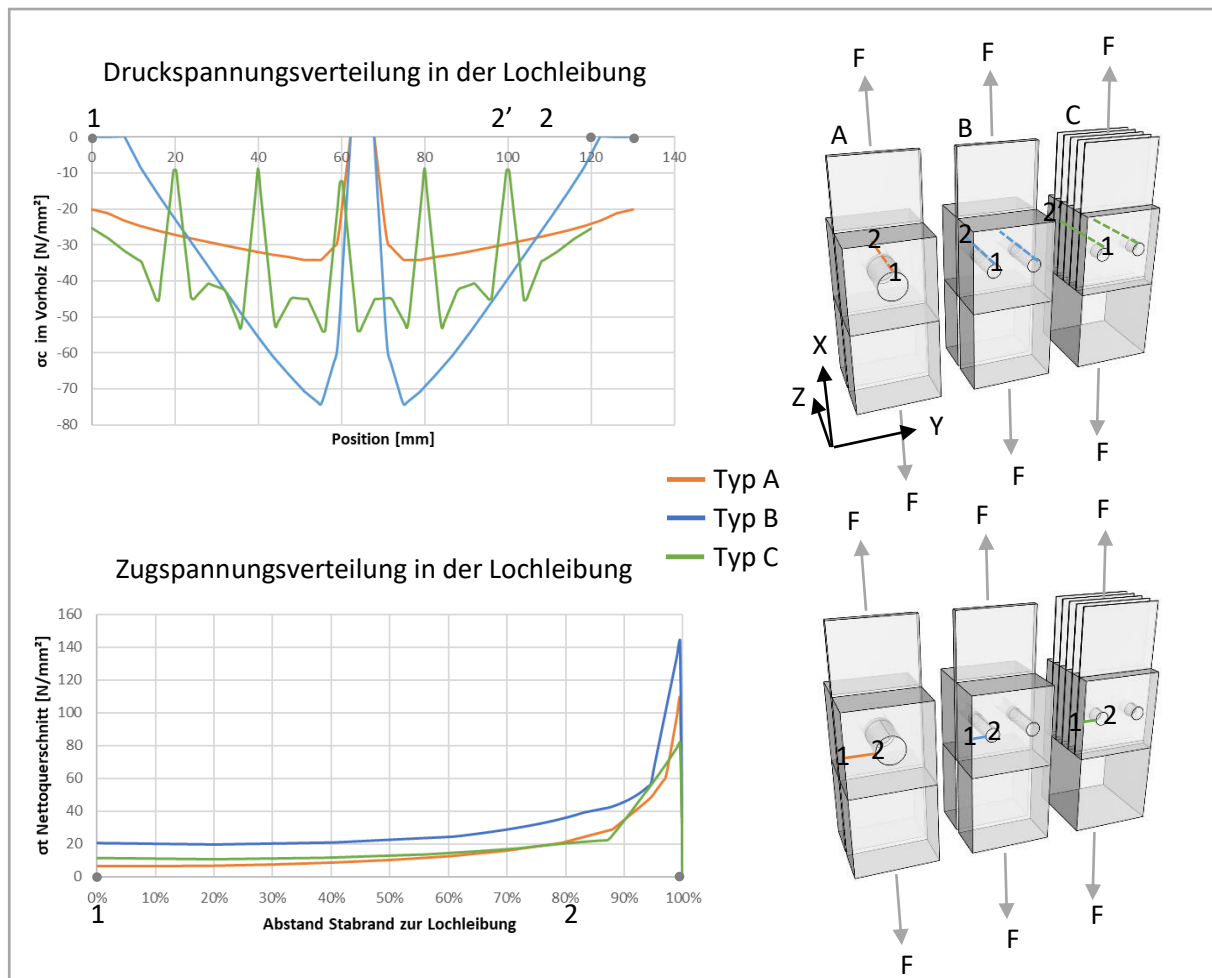


Abbildung 169: Druck- und Zugspannungsverteilung

Bei der Verwendung von Schlitzblechen im Anschlusstyp C wird durch das Schlitzten des verstärkten Stabendes die Nettoquerschnittsfläche durch die einzelnen Schlitzte in Richtung der Z-Achse geschwächt. Die Schwächung tritt im Anschlusstyp A und B nicht auf, da hier das Stahlblech nicht in den Stabkopf eingelassen wird, sondern sich zwischen zwei separaten Einzelstäben befindet. Dies hat zur Folge, dass bei gleichem Schlankheitsgrad die Druckbeanspruchung der Lochleibung bei Anschlusstyp C größer ist als in Anschlusstyp A oder B. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit von KP wirkt sich die höhere Beanspruchung der Lochleibung in der Druckzone jedoch unwesentlich auf die Tragfähigkeit des verstärkten Stabendes aus.

Mit dem Querschnittsverlust durch die Bohrung und mit dem Querschnittsverlust durch das Schlitzten wird die Querschnittsfläche in Richtung der Stabachse zweifach, zum einen in Y-Richtung, zum anderen in Z-Richtung, geschwächt. Im Vergleich zu ungeschlitzten und nur in Y-Richtung geschwächten Stabenden fallen die Zugspannungen in geschlitzten und in Y- sowie in Z-Richtung geschwächten Stabenden im Nettoquerschnitt (bei gleicher Verbindungsmittelschlankheit) folglich größer aus.

Die Spannungsanalyse zeigt, dass bei Anschlusstyp C geringere Zugspannungsspitzen im Nettoquerschnitt (Y-Richtung) auftreten als es bei Anschlusstyp B und A der Fall ist. Der Verlust an Querschnittsfläche wird demnach durch die homogenere Spannungsverteilung in der Lochleibung kompensiert (vgl. Abbildung 169, unten links).

6.1.2 Bemessung der Varianten

In Kap. 5.6.3, S. 165 ff. und Kap 5.7 S. 167 ff. wurde die Anwendbarkeit der Johansen-Gleichungen zur Bemessung KP-verstärkter Bauteilanschlüsse nachgewiesen. Für die drei zuvor skizzierten Varianten lassen sich folgende Anschluss Tragfähigkeiten mittels der Johansen-Gleichungen bestimmen:

Anmerkung: Der Nachweis der Stahlbleche wird nicht geführt.

Variante A

$d = 40 \text{ mm}$ (Stahl 16MnCr5) $n = 1$; $a_3 = 1,5 \times d$, $a_4 = 1,5 \times d$ / KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d & \text{(I) } 170,640 \text{ kN} \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) } 142,712 \text{ kN} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) } 229,867 \text{ kN} \end{array} \right.$$

$f_{h,1,k}^*$ **71,1 N/mm²** (vgl. Tabelle 32 im Anhang, S. A-3)

t_1 60 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 3.512.102 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5) (s. A-38 im Anhang)

$$F_{Rk} = 1 \times 2F_{v,Rk} = 285,42 \text{ kN}$$

Variante B

$d = 20 \text{ mm}$ (Stahl 16MnCr5) $n = 2$; $a_3 = 3,0 \times d$, $a_4 = 1,5 \times d$ / KP BE 335-1 67 %L/33 %Q

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d & \text{(I) } 151,440 \text{ kN} \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) } 75,973 \text{ kN} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) } 87,946 \text{ kN} \end{array} \right.$$

$f_{h,1,k}^*$ **126,2 N/mm²** (vgl. Tabelle 32 im Anhang, S. A-3, für $a_3 = 2,5 \times d$)

t_1 60 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 3.512.102 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5) (s. A-38 im Anhang)

$$F_{Rk} = 2 \times 2F_{v,Rk} = 303,89 \text{ kN}$$

Variante C

Teil 1 (beide Randschichten)

$d = 20 \text{ mm}$ (Stahl 16MnCr5) $n = 2$; $a_3 = 3,0 d$, $a_4 = 1,5 \times d$ / KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d & \text{(I) 48,461 kN} \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) 54,230 kN} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) 87,946 kN} \end{array} \right.$$

$f_{h,1,k}^*$ **126,2 N/mm²** (vgl. Tabelle 32 im Anhang, S. A-3, für $a_3 = 2,5 \times d$)

t_1 19,20 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 3.512.102 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5) (s. A-38 im Anhang)

$$F_{Rk,Teil1} = 2 \times 2F_{v,Rk} = 193,84 \text{ kN}$$

Teil 2 (vier Mittelschichten)

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 0,5 \times f_{h,2,k}^* \times d \times t_2 & \text{(I) 23,221 kN} \\ 1,15 \times \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h,2,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(II) 62,187 kN} \end{array} \right.$$

$f_{h,2,k}^*$ **126,2 N/mm²** (vgl. Tabelle 32 im Anhang, S. A-3, für $a_3 = 2,5 \times d$)

t_1 18,40 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 3.512.102 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5) (s. A-38 im Anhang)

$$F_{Rk,Teil2} = 2 \times 8F_{v,Rk} = 371,53 \text{ kN}$$

Teil 1 & 2:

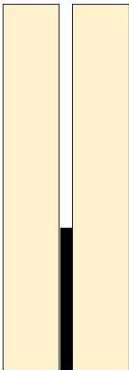
$$F_{Rk} = 193,84 \text{ kN} + 371,53 \text{ kN} = 565 \text{ kN}$$

Variante B zeigt in der FEM-Analyse höhere Spannungen als Variante A. Da die Lochleibungsfestigkeit mit abnehmendem Durchmesser des Verbindungsmittels jedoch steigt, kann mit Variante B dennoch eine höhere Tragfähigkeit erzielt werden.

Variante C zeigt in der FEM-Analyse - im Vergleich zu Variante A - ein ähnliches Spannungsniveau. Durch die fast doppelt so hohe Lochleibungsfestigkeit erhöht sich die Tragfähigkeit der Variante C deutlich gegenüber der Tragfähigkeit der Variante A.

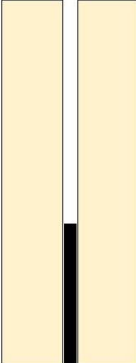
Die mittels der Johansen-Gleichungen berechneten Tragfähigkeiten ($k_{\text{mod}} = 0,8$; $\lambda_M = 1,3$) der drei Anschlussdetails sind in Tabelle 19 aufgeführt. Die Tabelle gibt Auskunft über die Verstärkungsmöglichkeiten von Hölzern unterschiedlicher Festigkeitsklassen. Neben den Ergebnissen aus den zuvor durchgeführten Berechnungen, sind zudem die Ergebnisse aus Berechnungen unter Berücksichtigung des Seileffektes mit aufgenommen.

Tabelle 19: Bemessung der drei Anschlüsse




Variante	ohne Seileffekt		mit Seileffekt	
A	* $k_{\text{mod}} = 1,0 / \lambda_M = 1,3$			
d = 40mm	F_{Rk} [kN]	285	F_{Rk} [kN]	341
	F_{Rd}^* [kN]	176	F_{Rd}^* [kN]	210
Verstärkung möglich?				
Nadelholz ($k_{\text{mod}} = 0,8 / \lambda_M = 1,3$)				
	Zug	Druck**	Zug	Druck**
C16	ja	ja	ja	ja
C24	ja	nein	ja	ja
C30	ja	nein	ja	ja
C35	nein	nein	ja	nein

**** falls Knicken ausgeschlossen ist**



Variante	ohne Seileffekt		mit Seileffekt	
B	$* k_{\text{mod}} = 1,0 / \lambda_M = 1,3$			
d = 20mm	F_{Rk} [kN]	304	F_{Rk} [kN]	380
	F_{Rd}^* [kN]	234	F_{Rd}^* [kN]	292
Verstärkung möglich?				
Nadelholz ($k_{\text{mod}} = 0,8 / \lambda_M = 1,3$)				
	Zug	Druck**	Zug	Druck**
C16	ja	ja	ja	ja
C24	ja	ja	ja	ja
C30	ja	nein	ja	ja
C35	ja	nein	ja	ja

**** falls Knicken ausgeschlossen ist**



Variante	ohne Seileffekt		mit Seileffekt	
C	* $k_{\text{mod}} = 1,0 / \lambda_M = 1,3$			
d = 20mm	F_{Rk} [kN]	565	F_{Rk} [kN]	658
	F_{Rd}^* [kN]	435	F_{Rd}^* [kN]	506
Verstärkung möglich?				
Nadelholz ($k_{\text{mod}} = 0,8 / \lambda_M = 1,3$)				
	Zug	Druck**	Zug	Druck**
C16	ja	ja	ja	ja
C24	ja	ja	ja	ja
C30	ja	ja	ja	ja
C35	ja	ja	ja	ja

**** falls Knicken ausgeschlossen ist**

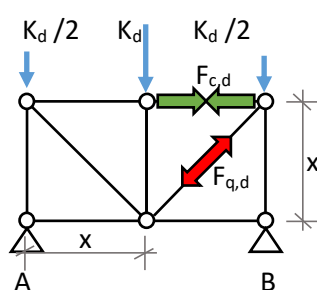
6.1.3 Fachwerkstrukturen

6.1.3.1 Grundsätze der Bemessung – Nachweis auf Normalkraft

In symmetrisch aufgebauten und biegebeanspruchten Fachwerkträgern sind unter rein vertikaler Beanspruchung in den Knoten die Normalkräfte der beiden Gurtstäbe in ein und demselben Fach nicht gleich groß. Bei zugbeanspruchten Diagonalstäben ist die Druckkraft im Obergurt größer als die Zugkraft im Untergurt. Dies rührt daher, dass mit der Aufteilung des globalen Biegemomentes in ein Kräftepaar der Kraftanteil in der globalen Biegezugzone sich auf Untergurtstab und die Horizontalkomponente des Diagonalstabes aufteilt, während der Obergurtstab den vollen Kraftanteil abzutragen hat. Bei druckbeanspruchten Diagonalstäben ist es umgekehrt. Der Unterschied zwischen der Zug- und der Druckkraft in den beiden maßgebenden Mittelgefachen verringert sich mit zunehmender Anzahl der Gefache. Die Größe der Knotenlasten wird durch die Tragfähigkeit der maßgebenden Stäbe begrenzt. Für Fachwerke mit quadratischen Gefachen lassen sich für die maßgebenden Mittelgefache folgende mathematischen Zusammenhänge zwischen Knotenlasten, Gurtbeanspruchung und Beanspruchung der Diagonalen ableiten:

Beispiel für zwei Gefache mit zum Auflager hin steigenden Diagonalen

(Druckkraft im Obergurt maßgebend)



$$-F_{c,d} \times x = A \times x - \frac{K_d}{2} \times x$$

$$-F_{c,d} = \frac{\frac{2K_d}{2} \times x - \frac{K_d}{2} \times x}{x}$$

$$K_d = -2 \times F_{c,d}$$

bzw.

$$F_{c,Rd} \geq -\frac{K_d}{2}$$

Abbildung 170: Fachwerk mit zwei Gefachen

$F_{c,d}$ Bemessungswert der Druckkraft im Obergurt K_d Bemessungswert der Knotenlast
 $F_{c,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit im Druckgurt

Allgemein gilt für symmetrische Fachwerke mit zum Auflager hin steigenden Diagonalen und n Gefache für die Mittelgefache:

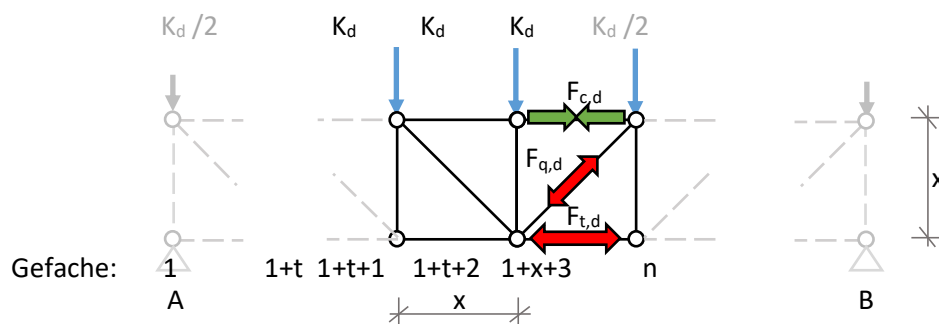


Abbildung 171: Fachwerk mit n Gefachen

$$-F_{c,d} \times x = A \times (1 + t + 1) \times x - \frac{K_d}{2} \times (1 + t + 1) \times x - K_d \times (1 + t) \times x - \dots - K_d \times x$$

$$-F_{c,d} \times x = \frac{n \times K_d}{2} \times \left(\frac{n}{2}\right) \times x - \frac{K_d}{2} \times \left(\frac{n}{2}\right) \times x - K_d \times \left(\frac{n}{2} - 1\right) \times x - \dots - K_d \times x$$

$$-F_{c,d} = \left[n \times \frac{K_d}{2} \times \left(\frac{n}{2}\right) \right] - \underbrace{\left[\frac{K_d}{2} \times \left(\frac{n}{2}\right) - K_d \times \left(\frac{n}{2} - 1\right) - \dots - K_d \right]}_{= \frac{1}{2} \times n \times \frac{K_d}{2} \times \left(\frac{n}{2}\right)}$$

$$-F_{c,d} = \frac{1}{2} \times \left[n \times \frac{K_d}{2} \times \frac{n}{2} \right]$$

$$-F_{c,d} = K_d \times \frac{n^2}{8}$$

$$K_d = \frac{-8 \times F_{c,d}}{n^2}$$

bzw.

$$F_{c,Rd} \geq -K_d \times \frac{n^2}{8}$$

$$F_{q,d} = \frac{K_d}{2} \times \sqrt{2}$$

$$F_{t,Rd} \geq K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2}$$

$$K_d = \frac{F_{t,d}}{\frac{n^2}{8} - \frac{1}{2}}$$

$F_{t,d}$ Bemessungswert der Zugkraft im Untergurt der beiden Mittelgefachen

$F_{q,d}$ Bemessungswert Zugkraft im Diagonalstab

$F_{t,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit im Zuggurt

wenn n = ungeradzahlig

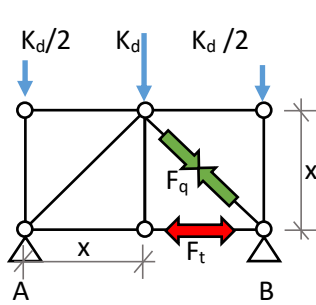
$$F_{t,Rd} \geq K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)$$

bzw.

$$F_{c,Rd} \geq -K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)$$

$$K_d = \frac{F_{t,d}}{\frac{n^2}{8} - \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)}$$

Beispiel für zwei Gefache mit zum Auflager hin fallenden Diagonalen
(Zugkraft im Untergurt maßgebend)



$$F_{t,d} \times x = A \times x - \frac{K_d}{2} \times x$$

$$F_{t,d} = \frac{\frac{2K_d}{2} \times x - \frac{K_d}{2} \times x}{x}$$

$$K_d = 2 \times F_{t,d}$$

bzw.

$$F_{t,Rd} \geq \frac{K_d}{2}$$

Abbildung 172: Fachwerk mit zwei Gefachen

Allgemein gilt für symmetrische Fachwerke mit zum Auflager hin fallenden Diagonalen und n Gefache für die Mittelgefache:

$$K_d = \frac{-8 \times F_{t,d}}{n^2}$$

$$F_{t,Rd} \geq K_d \times \frac{n^2}{8}$$

$$F_{q,d} = \frac{K_d}{2} \times \sqrt{2}$$

$$F_{c,Rd} \geq -K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2}$$

bzw.

$$K_d = \frac{-F_{c,d}}{\frac{n^2}{8} + \frac{1}{2}}$$

wenn n = ungeradzahlig

$$F_{t,Rd} \geq K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)$$

bzw.

$$F_{c,Rd} \geq -K_d \times \frac{n^2}{8} - \frac{K_d}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)$$

$$K_d = \frac{-F_{t,d}}{\frac{n^2}{8} + \frac{1}{2} \times \left(1 - \frac{1}{2 \times \sqrt{2}}\right)}$$

Bemessungshintergrund für Stäbe mit verstärkten Enden aus KP

Im Rahmen dieser Arbeit wurde für verstärkte Zugstäbe der Nachweis erbracht, dass die volle Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts des nativen Nadelholzes bis Festigkeitsklasse C35 angesetzt werden kann (vgl. Kap. 5.6).

Die Tragfähigkeit des Zugstabes in Faserrichtung $F_{t,0,Rd}$ berechnet sich mit:

$$F_{t,0,Rd} = A_{brutto} \times f_{t,0,d} \times k_h$$

A_{brutto} Bruttoquerschnittsfläche k_h Höhenfaktor

$f_{t,0,d}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} \right. \\ \left. 1,3 \right\}$$

Die Tragfähigkeit des Druckstabes in Faserrichtung $F_{c,0,Rd}$ (ohne Knicken) berechnet sich mit:

$$F_{c,0,Rd} = A_{brutto} \times f_{c,0,d}$$

$f_{c,0,d}$ Bemessungswert der Druckkraft

Konsequenz für die Planung

Aus architektonischen Gründen haben die Gurtstäbe in Fachwerkkonstruktionen in der Regel einen über alle Gefache hinweg gleichen Querschnitt, der für die maßgebenden Stäbe ermittelt wird. Die Auslastung der Fachwerkstäbe wird von den charakteristischen Zug- und Druckfestigkeiten längs der Faser des eingesetzten Holzes, der Stablänge und der damit verbundenen Knickgefährdung und der Anzahl der Gefache bestimmt.

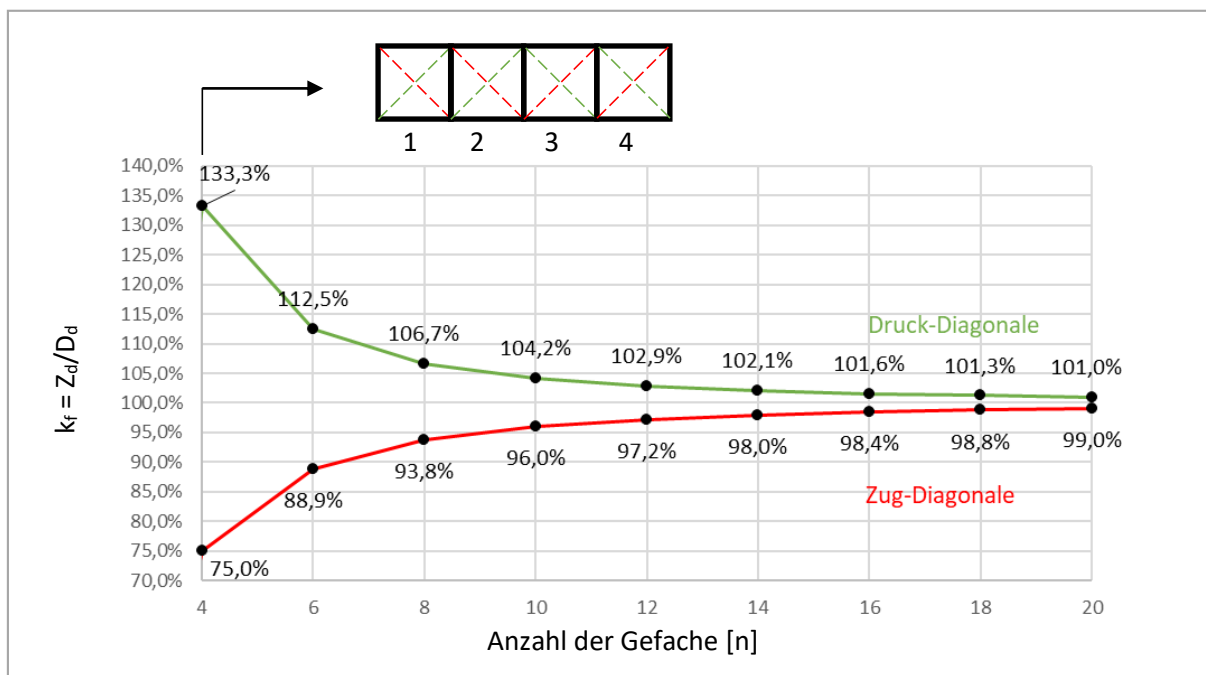


Abbildung 173: Fachwerkfactor k_f als Quotient aus Zugkraft im Untergurt- und Druckkraft im Obergurtstab für symmetrische Fachwerke mit quadratischen Gefachen

In Abbildung 173, S. 181 wird das Verhältnis aus Zugkraft im Untergurtstab und Druckkraft im Obergurtstab des maßgebenden Faches in Abhängigkeit der Ausbildung der Diagonalstäbe dargestellt. Aus ihr geht hervor, dass bei einer geringen Anzahl von Gefachen der Betrag der Kräfte in den maßgebenden Gurtstäben stark voneinander abweicht. Mit zunehmender Anzahl der Gefache nimmt der Kräfteunterschied ab.

6.1.3.2 Grundsätze der Bemessung – Nachweis auf Knicken

Auf Knicken muss folgender Nachweis erbracht werden:

$$\frac{N_d}{A_n} \leq k_c \times f_{c,0,d}$$

Der Bemessungswert der kritischen Druckkraft $F_{c,0,Rd,knicken}$

$$F_{c,0,Rd,knicken} = k_c \times f_{c,0,d} \times A_n$$

N_d	Bemessungswert der Druckkraft	$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit
A_n	Nettoquerschnittsfläche	k_c	Knickbeiwert vgl.

Tabelle 29, im Anhang S. A-1

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}$$

i	Trägheitsradius mit $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$	l_{ef}	Ersatzstablänge mit $l_{ef} = l \times \beta$
l	Stablänge	β	Knicklängenbeiwert

Bestimmung der effektiven Stablänge

Für die nachfolgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der Gefache ausreichend groß ($n = 10$) ist, damit die Druckkraft im Obergurtstab und die Zugkraft im Untergurtstab annähernd betragsgleich sind.

Die charakteristische Druckfestigkeit von Nadelholz ist - je nach Festigkeitsklasse - ca. 40 % (C35) bis 70 % (C16) höher als die charakteristische Zugfestigkeit. Aus diesem Grund wäre die Ausnutzung der ein Kräftepaar bildenden Gurtstäbe nicht gleich hoch, sofern der Querschnitt gleich und ein Knicken des Druckstabes ausgeschlossen ist. Die Ausnutzung ist dann gleich, wenn die Stablänge gesteigert wird, bis die Tragfähigkeit des Druckgurtstabes - unter Berücksichtigung der Knickgefährdung - der Tragfähigkeit des Zugstabes entspricht.

Nachfolgend wird am Beispiel eines Querschnitts der Festigkeitsklasse C24 diejenige effektive Stablänge bestimmt, unter der die Tragfähigkeit des maßgebenden Gurtstabpaares betragsgleich ist. Hierzu muss zunächst der Knickfaktor ermittelt werden, um daraus eine entsprechende Stabschlankheit λ ableiten zu können.

$$k_c = \frac{F_{t,0,Rd}}{F_{c,0,Rd}}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{f_{t,0,k} \times k_h}{f_{c,0,k}} \times \frac{k_{mod} \times \frac{1}{1,3}}{k_{mod} \times \frac{1}{1,3}} \\
&= \frac{14 \text{ N/mm}^2 \times 1,046}{21 \text{ N/mm}^2} \\
&= 0,697 \rightarrow \lambda = 57,9
\end{aligned}$$

Die effektive Stablänge berechnet sich mit:

$$l_{ef} = l \times \beta = \lambda \times i$$

Für Nadelholz C24 können die effektiven Stablängen unterschiedlicher Stabquerschnitte Tabelle 20 entnommen werden. Unter Kenntnis der maßgebenden größten Stabkraft können Stäbe bis zur effektiven Stablänge sowohl als Druckgurt- als auch als Zuggurtstab eingesetzt werden.

Tabelle 20: Effektive Stablänge bei der die Tragfähigkeit unter einer Druckbeanspruchung und Zugbeanspruchung gleich sind

Festigkeitsklasse	b,h [mm]	F _{t,0,Rd} [kN]*	l _{ef} [cm]
C24	12	129,8	201
	18	279,1	312
	24	496,2	416

* k_{mod} = 0,8 | λ_M = 1,3 | k_{h12} = 1,046 | k_c nach Tabelle 29, im Anhang S. A-1

Systemraster und Stablänge

Im Holzbau haben sich strukturelle Systemraster von 62,5 cm und seltener 83,3 cm etabliert. Plattenwerkstoffe und Dämmmatten bauen mitunter auf einem Systemraster von 62,5 cm oder einem Vielfachen davon auf. Die Verwendung von Konstruktionsrastern als n-fache Systemraster erleichtert die Planungsarbeit, da sich mit Hilfe der Konstruktionsraster leicht Haupttrag- und Nebentragsysteme ableiten lassen. Für aufgelöste Träger macht es demnach Sinn, ein Konstruktionsraster zu entwickeln, das auf einem Vielfachen des Systemrasters von 62,5 cm aufbaut.

Bemessungstabelle

Tabelle 21: Bemessungstabelle für mit KP verstärkte Stäbe mit quadratischem Querschnitt

Festigkeitsklasse	b,h [mm]	F _{t,0,Rd} [kN]*	F _{c,0,Rd} [kN]*	K-Raster [cm]	$\frac{F_{t,0,Rd}}{F_{c,0,Rd}}$	Mindestanzahl der Gefache
C24	12	129,8	139,1	187,5	93,3 %	8
	18	279,1	341,2	250	81,8%	6
	24	496,2	556,6	375	89,2%	6**

* k_{mod} = 0,8 | λ_M = 1,3 | k_{h12} = 1,046 | k_c nach Tabelle 29, im Anhang S. A-1

** Überschreitung von F_{c,0,Rd} von 0,3%

Tabelle 21, S. 183 gibt die Tragfähigkeit der Druck- und Zugstäbe (Gurtstäbe und Pfosten) unter Einhaltung definierter Konstruktionsraster in Abhängigkeit des Querschnitts von Stäben der Festigkeitsklasse C24 wieder. Sie gibt ferner den Quotienten aus der Zugtragfähigkeit und der Drucktragfähigkeit an, für den sich nach Abbildung 173, S. 181 die Mindestanzahl quadratischer Gefache ableiten lässt.

6.1.3.3 Fachwerkmodule

Der Aufbau von Tragstrukturen aus standardisierten Grundmodulen bietet die Möglichkeit einer seriel- len Produktion und damit der Kostenminimierung durch die stetige Herstellung gleicher Elemente ge- genüber einer individuellen Einzelproduktion. Die Modulelemente können entsprechend vorprodu- ziert und bis zum Einsatz gelagert werden. Gleichzeitig bietet nur der modulare Aufbau die Möglichkeit einer wirtschaftlichen Wiederverwendbarkeit der Bauteile.

Während das individuelle Einzelprodukt auf die jeweilige individuelle Anforderung entsprechend aus- gelegt werden kann, müssen standardisierte Einzelmodule entweder für den ungünstigsten Fall ausge- legt oder gesonderte Randbedingungen für deren Einsatz definiert werden.

Für die Kennwerte in Abbildung 176, S. 186, Tabelle 22, S. 187 und Abbildung 177, S. 187 werden nach- folgende Randbedingungen definiert:

- das Biegedrillknicken des Fachwerkträgers in die Trägerebene sei durch einen entsprechenden Decken- oder Dachaufbau auszuschließen,
- die Gefache sind quadratisch,
- die Mindestanzahl der Fache beträgt 8
- die Zug-Diagonalen sind entsprechend Tabelle 22, S. 187 geregelt

Um den Bauteiltransport wirtschaftlich zu optimieren, sollten Teillängen von Tragkonstruktionen auf die Maße der Ladeflächen von Einzelfahrzeugen oder Sattelschleppern ausgelegt werden.

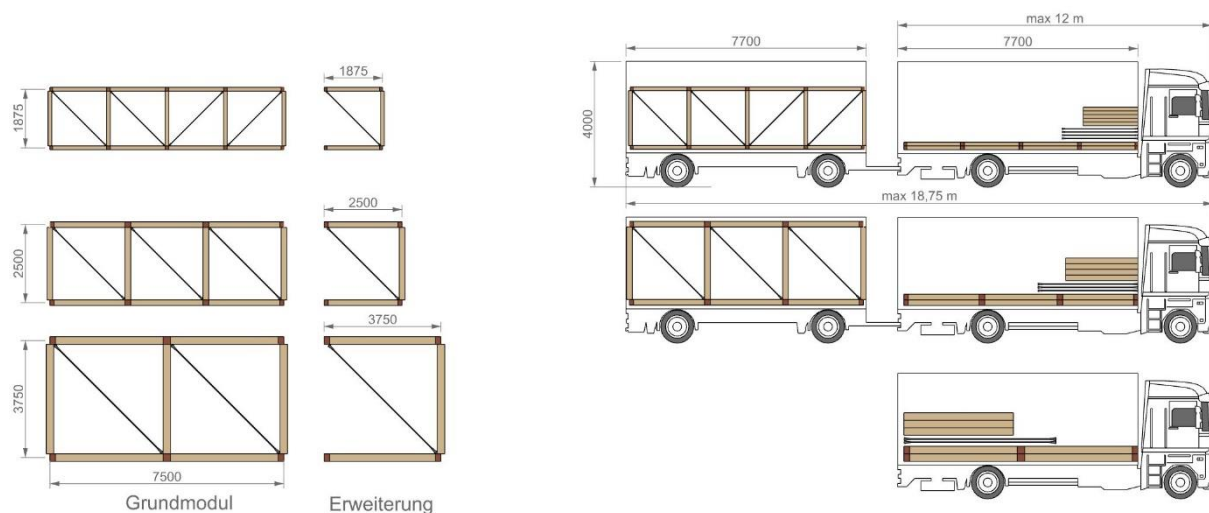


Abbildung 174: Transportoption mit Einzelfahrzeugen

Während die Ladefläche von Einzelfahrzeugen gemäß Abbildung 174, S. 184 bei ca. 7,7 m begrenzt ist, liegt die Ladefläche von Sattelschleppern gemäß Abbildung 175 bei ca. 13,6 m. In beiden Fällen ist ein Ladungsüberhang von 1,5 m, bei Fahrten unter 100 km bis 3,0 m erlaubt. (StVZO, 2019)

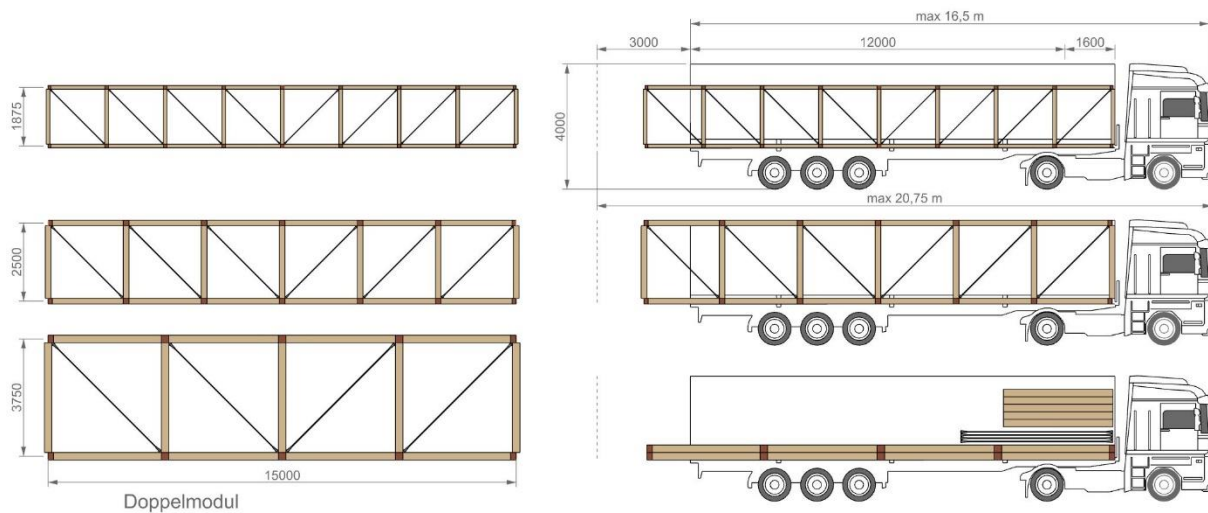


Abbildung 175: Transportoption mit Sattelschlepper

Unter Beachtung der im Holzbau üblichen Achsraster von 62,5 cm bzw. einem Vielfachen und der für den Transport von Einzelfahrzeugen und Sattelschleppern möglichen Lademaße, lässt sich ein wirtschaftliches Grundmodul von 7,5 m für Einzelfahrzeuge (vgl. Abbildung 174, links, S. 184) und Doppelmodul von 15,0 m für Sattelschlepper (vgl. Abbildung 175, links) ableiten.

Mit einem Achsraster von:

- 1,875 m (120 mm / 120 mm) ergeben 4 Gefache ein Grundmodul und 8 Gefache ein Doppelmodul
- 2,5 m (180 mm / 180 mm) ergeben 3 Gefache ein Grundmodul und 6 Gefache ein Doppelmodul
- 3,75 m (240 mm / 240 mm) ergeben 2 Gefache ein Grundmodul und 4 Gefache ein Doppelmodul

Spannweiten außerhalb eines Vielfachen des Grundmoduls werden durch ein Erweiterungsmodul mit einem einzelnen Achsraster ermöglicht, vgl. Abbildung 174, links, S. 184.

Die Module basierend auf den Querschnitten 120 mm / 120 mm und 180 mm / 180 mm können sowohl vormontiert als auch in Einzelementen transportiert werden. Der Transport von Modulen basierend auf dem Querschnitt 240 mm / 240 mm ist ausschließlich in Einzelteilen möglich, da sonst die zulässige Gesamthöhe des Transportfahrzeuges von 4,0 m (StVZO, 2019) überschritten würde und eine Sondergenehmigung für den Transport eingeholt werden müsste.

Abbildung 176, S. 186 stellt unten die möglichen Systemspannweiten von 15 m bis 45,0 m dar, die mit der Kombination aus Einzel- und / oder Doppelmodulen erzielt werden können. Oben sind die Linienlasten in Abhängigkeit der Systemspannweite und der Querschnittsabmessungen als Bemessungswert q_d aufgeführt.

Mit Hilfe der Tabelle lassen sich die erforderlichen Trägerabstände wie folgt bestimmen:

$$e_{\text{erf.}} \leq \frac{q_{\text{max,d}}}{q_d^-}$$

q_d^- Bemessungswert der Flächenlast

$q_{\text{max,d}}$ maximale Design-Linienlast

$e_{\text{erf.}}$ erforderlicher Trägerabstand

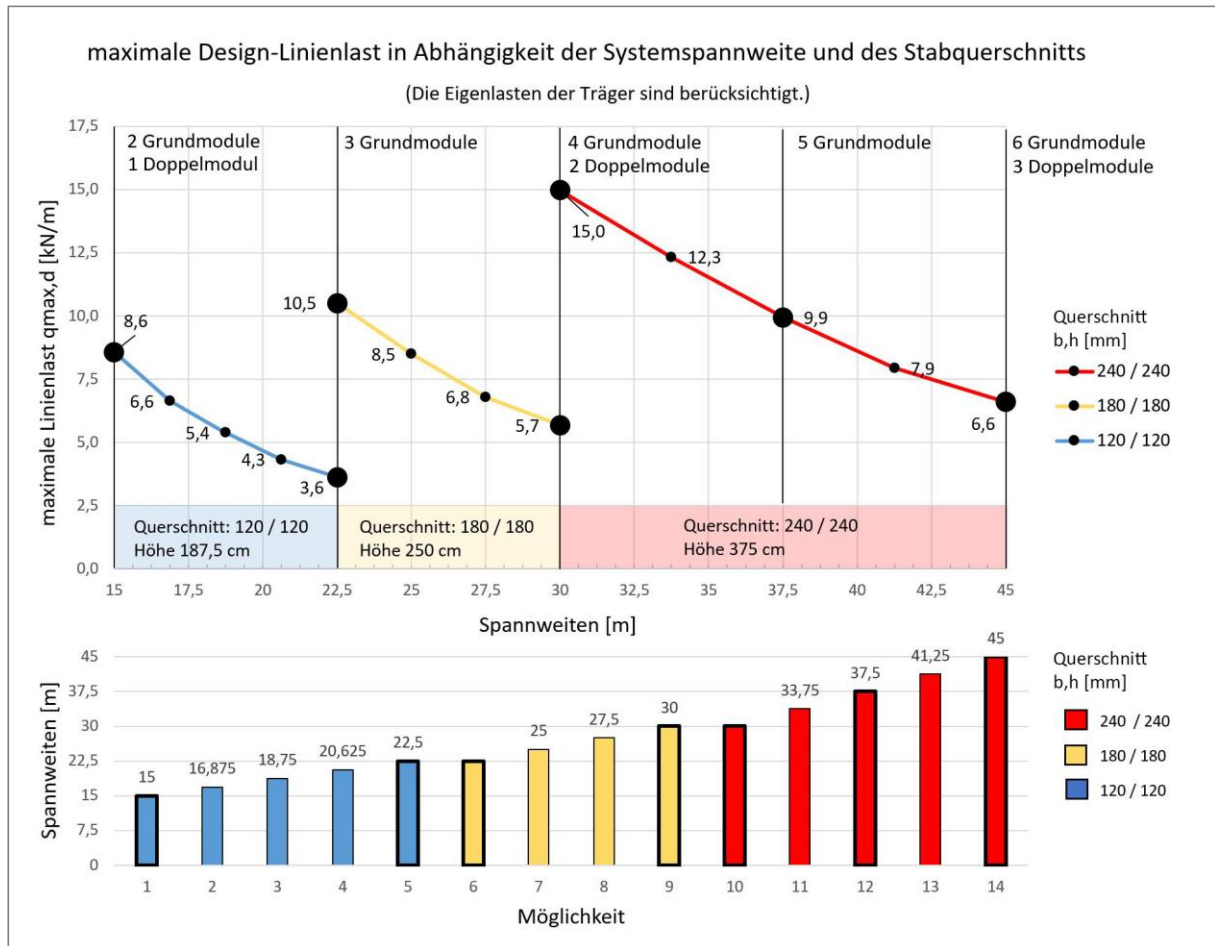


Abbildung 176: Maximale Linienlast von Modulsystemen unterschiedlichen Querschnitts und unterschiedlicher Spannweite für den Standardfall

In Abbildung 177, S. 187 ist jeweils der Trägerabstand e für ein leichtes Hallendach mit $q_d = 1,8 \text{ kN/m}^2$ ⁵⁸ und für ein schweres Hallendach mit $q_d = 5,5 \text{ kN/m}^2$ ⁵⁹ für unterschiedliche Systemspannweiten und für unterschiedliche Modulquerschnitte dargestellt. Diese Graphik kann als Planungshilfe für Planerinnen und Planern zur Abschätzung des Trägerabstandes genutzt werden.

⁵⁸ Wind + Schnee + Eigenlast Dach (Aufbau mit Sandwichplatte)

⁵⁹ Wind + Schnee + Eigenlast Dach (Aufbau mit extensiver Dachbegrünung)

Tabelle 22: Bemessungstabelle im Standardfall für die KP verstärkten Holzquerschnitte (C24) mit 120 mm / 120 mm, 180 mm / 180 mm und 240 mm / 240 mm

Querschnitt: 120 mm / 120 mm						Feld: 187,5 cm x 187,5 cm				
Geometrie		Tragfähigkeit als		Anschluss		Zugstange	maximale Stabkräfte im System			
Felder	Spannweite	Linienlast ⁽¹⁾	Knotenlast	Bleche (s355)	Bolzen (8.8)	Produkt	Pfosten	Diagonale	Zugstab	Druckstab
n	[m]	q_{Rd} [kN/m]	K_{Rd} [kN]	t [mm]	d [mm]	Besista s540 N	P_d [kN]	S_d [kN]	Z_d [kN]	D_d [kN]
8	15	8,6	16,1	18,0	20,0	M16 Fmax = 81,4 kN	65,8	81,4	123,4	131,6
9	16,875	6,6	12,4				57,7	72,5	125,7	125,7
10	18,75	5,4	10,1				52,4	66,6	125,7	130,9
11	20,625	4,3	8,1				46,7	60,0	125,7	125,7
12	22,5	3,6	6,8				43,1	55,8	125,7	129,2

Querschnitt: 180 mm / 180 mm						Feld: 250 cm x 250 cm				
Geometrie		Tragfähigkeit als		Anschluss		Zugstange	maximale Stabkräfte im System			
Felder	Spannweite	Linienlast ⁽¹⁾	Knotenlast	Bleche (s355)	Bolzen (8.8)	Produkt	Pfosten	Diagonale	Zugstab	Druckstab
n	[m]	q_{Rd} [kN/m]	K_{Rd} [kN]	t [mm]	d [mm]	Besista s540 N	P_d [kN]	S_d [kN]	Z_d [kN]	D_d [kN]
9	22,5	10,5	26,3	25,0	30,0	M22 Fmax = 157,1 kN	123,6	155,4	269,3	269,3
10	25	8,5	21,2				112,2	142,8	269,3	280,5
11	27,5	6,8	17,0				100,0	128,6	269,3	269,3
12	30	5,7	14,2				92,3	119,7	269,3	276,9

Querschnitt: 240 mm / 240 mm						Feld: 375 cm x 375 cm				
Geometrie		Tragfähigkeit als		Anschluss		Zugstange	maximale Stabkräfte im System			
Felder	Spannweite	Linienlast ⁽¹⁾	Knotenlast	Bleche (s355)	Bolzen (8.8)	Produkt	Pfosten	Diagonale	Zugstab	Druckstab
n	[m]	q_{Rd} [kN/m]	K_{Rd} [kN]	t [mm]	d [mm]	Besista s540 N	P_d [kN]	S_d [kN]	Z_d [kN]	D_d [kN]
8	30	15,0	56,1	30,0	40,0	M30 Fmax = 290,8 kN	235,0	290,8	440,6	470,0
9	33,75	12,3	46,2				219,8	276,3	478,7	478,7
10	37,5	9,9	37,3				199,4	253,9	478,7	498,6
11	41,25	7,9	29,7				177,9	228,7	478,7	478,7
12	45	6,6	24,7				164,1	212,8	483,5	483,5

⁽¹⁾ Linienlast vereinfacht als K_{Rd} / l_{Feld}

(1) Linienlast vereinfacht als $q_{Rd} = K_{Rd} / l_{Feld}$; Lasten sind in den Knotenpunkten einzuleiten; die Eigenlasten der Träger sind bereits in den aufgeführten Linien- und Knotenlasten berücksichtigt.

■ grau hinterlegte Felder: maßgebendes Element für die Bemessung des Binders

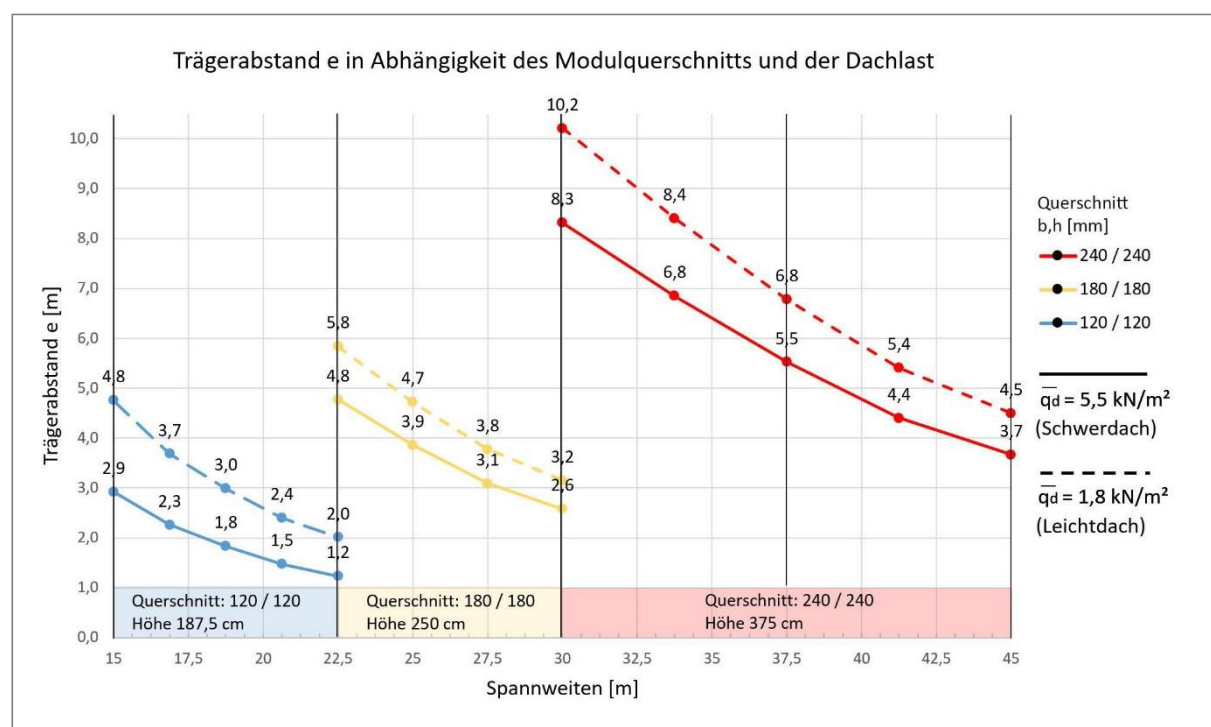


Abbildung 177: Planungshilfe für den Standardfall zur „Abschätzung“ möglicher Trägerabstände in Abhängigkeit der Dachlast, der Systemspannweite und des Modultyps

6.1.3.4 Exemplarische Bemessung eines verstärkten Stabquerschnitts

Exemplarische Bemessung des verstärkten Stabquerschnitts KVH 120 mm / 120 mm, C24:

Es sind folgende Nachweise für die jeweils minimale Spannweite nach Tabelle 22, S. 187 zu führen:

- 1 Bemessung des Zuggurtes auf Normalkraft
- 2 Bemessung des Druckgurtes auf Druck bzw. auf Knicken
- 3 Bemessung des Pfostens auf Druck bzw. auf Knicken
- 4 Bemessung des verstärkten Modulstoßes auf Lochleibung
- 5 Bemessung der Schlitzbleche des Modulstoßes auf Lochleibung
- 6 Bemessung des verstärkten Stabanschlusses innerhalb des Moduls
- 7 Bemessung des Schlitzbleches des Modulstoßes auf Lochleibung

Randbedingungen: Als Zugdiagonalen werden eingesetzt:

Besista M16, S540 N

mit $N_{R,d} = 81,4 \text{ kN}$ (Herstellerangebe)

Anmerkung: Die volle Tragfähigkeit des maßgebenden Zuggurt-Stabes kann dann erst ab 9 Fachen angesetzt werden.

1) Bemessung des Zuggurtes

$$F_{t,Rd} = A_{netto} \times f_{t,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \times k_h$$
$$F_{t,Rd} = 13.890 \text{ mm}^2 \times 14 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \frac{0,8}{1,3} \times 1,05$$
$$F_{t,Rd} = 125,7 \text{ kN}$$

A_{netto} nach Konstruktionszeichnung = 13.890 mm²

2) Nachweis des Druckgurtes auf Normalkraft:

Ungünstigster Fall: 8 Felder

$k_f = 93,8 \%$ (s. Abbildung 173, S. 181)

Nachweis: $F_{c,Rd} \geq \frac{F_{t,Rd}}{k_f}$

$$A_{netto} \times f_{c,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 171,4 \text{ kN} > \frac{125,7 \text{ kN}}{93,8\%} = 127,9 \text{ kN (✓)}$$

2.1) Bemessung des Druckgurtes auf Knicken:

$$\text{Nachweis: } F_{c,d} \leq F_{c,0,Rd,knicken} = k_c \times f_{c,0,d} \times A_n$$

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}$$

$$\lambda = \frac{187,5 \text{ mm}}{3,46 \text{ cm}} = 54,2 \rightarrow k_c = 0,74771 \text{ (vgl. Tabelle 29, S. A-1)}$$

$$\text{Anmerkung: } F_{c,d} \text{ ist bei 8 Feldern } \frac{F_{t,Rd}}{93,8 \%} = 127,9 \text{ kN}$$

$$F_{c,0,d,knicken} = 0,74771 \times 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \frac{0,8}{1,3} \times 14.400 \text{ mm}^2 = 139,14 \text{ kN}$$

$$127,9 \text{ kN} < 139,14 \text{ kN} (\checkmark)$$

3) Nachweis des Randpfostens auf Normalkraft:

$$\text{Nachweis: } P_d \leq F_{c,Rd} = A_{netto} \times f_{c,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$P_d = 65,8 \text{ kN}$$

(vgl. Tabelle 22, S. 187, Querschnitt 120 mm / 120 mm, 8 Felder)

$$P_d \leq A_{netto} \times f_{c,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 11.800 \text{ mm}^2 \times 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \frac{0,8}{1,3} = 152,49 \text{ kN} (\checkmark)$$

A_{netto} des Pfostens nach Konstruktionszeichnung = 11.800 mm²
(vgl. Abbildung 182 und Abbildung 183, S. 196)

3.1) Bemessung des Randpfostens auf Knicken:

$$\text{Nachweis: } P_d \leq F_{c,0,Rd,knicken} = k_c \times f_{c,0,d} \times A_n$$

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i}$$

$$\lambda = \frac{187,5 \text{ mm}}{3,46 \text{ cm}} = 54,2 \rightarrow k_c = 0,74771$$

$$F_{c,0,Rd,knicken} = 0,74771 \times 21 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \frac{0,8}{1,3} \times 14.400 \text{ mm}^2 = 139,14 \text{ kN}$$

$$P_d = 65,8 \text{ kN} < F_{c,0,Rd,knicken} = 139,14 \text{ kN} (\checkmark)$$

4) Bemessung des verstärkten Modulstoßes auf Lochleibung unter Verwendung von Bolzen mit $d = 20 \text{ mm}$, Festigkeit 8.8

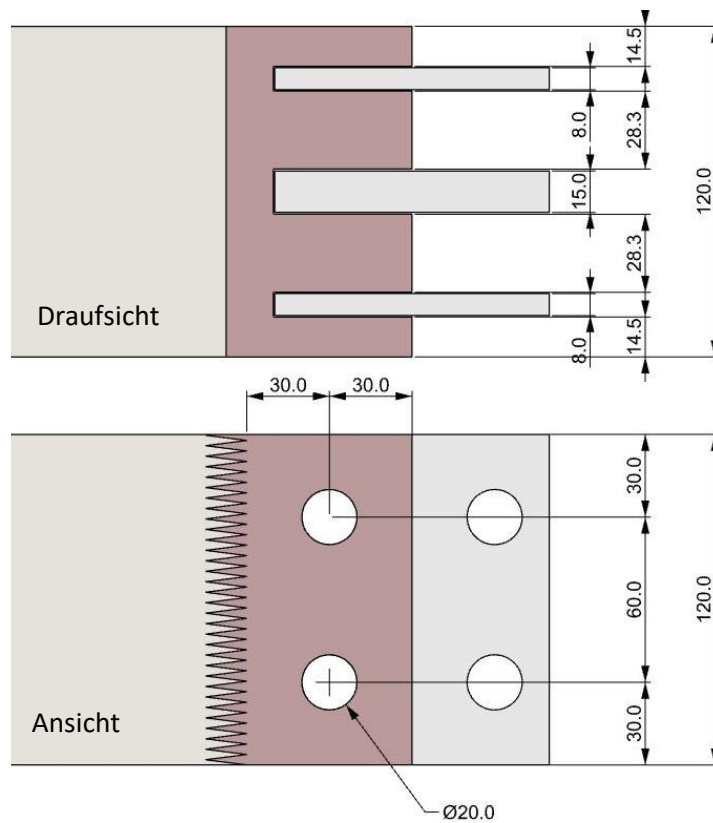


Abbildung 178: Modulstoß

Teil 1 (beide Randschichten)

$d = 20 \text{ mm}$ (Stahl 16MnCr5) $n = 2$; $a_3 = 3,0 \times d$, $a_4 = 1,5 \times d$ / KP BE 335-1 67 %L / 33 %Q

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{array} \right.$$

(I) 24,868 kN
(II) 47,317 kN
(II) 72,495 kN

$f_{h,1,k}^*$ 85,8 N/mm² (vgl. Tabelle 32, im Anhang S. A-3, für $a_3 = 1,5 \times d$)

t_1 14,50 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 579.281 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ 0

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5)

Da (I) << (II) < (III)
ist das Plastifizieren der
VM ausgeschlossen und
ein Lösen der Verbindung
möglich.

$$F_{Rk,Teil1} = 2 \times 2F_{v,Rk} = 99,47 \text{ kN}$$

Teil 2 (beide Mittelschichten)

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \frac{0,5 \times f_{h,2,k}^* \times d \times t_2}{1,15 \times \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h,2,k}^* \times d + \frac{F_{Qk,Rk}}{4}}} \right\}$$

(I) 24,267 kN
(II) 52,261 kN

$f_{h,2,k}^*$ **85,8 N/mm²** (vgl. Tabelle 32, im Anhang S. A-3, für $a_3 = 1,5 \times d$)

t_2 28,30 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 579.281 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5)

Da (I) << (II) < (III)
ist das Plastifizieren der
VM ausgeschlossen und
ein Lösen der Verbindung
möglich.

$$F_{Rk,Teil2} = 2 \times 2 \times 2F_{v,Rk} = 194,14 \text{ kN}$$

Teil 1 & 2:

$$F_{Rk} = 99,47 \text{ kN} + 97,07 \text{ kN} = 293,62 \text{ kN}$$

Nachweis für den ungünstigsten Fall: Knotenpunkt in Feldmitte

$$\text{Nachweis: } F_{Rd,Anschluss} \geq F_{t,Rd,Zugstab}$$

$$293,62 \text{ kN} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 180,68 \text{ kN} > 125,7 \text{ kN} (\checkmark)$$

5) Bemessung der Schlitzbleche auf Lochleibung

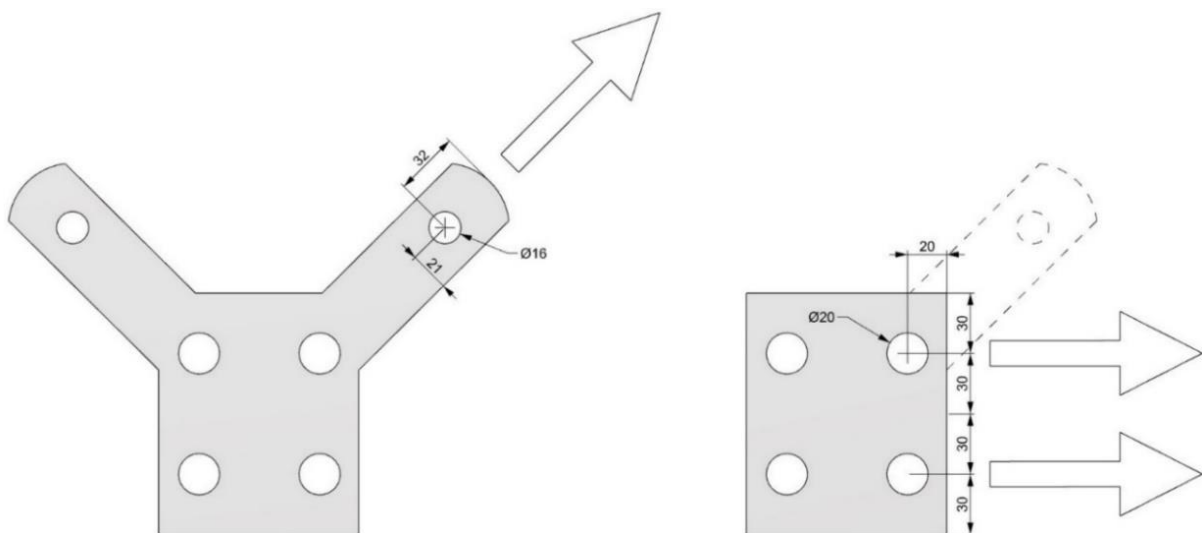


Abbildung 179: Geometrie Anschlussblech (S355), links Anschluss Zugdiagonale, rechts: Anschluss Zuggurt

Anschluss Zugdiagonale, d = 16 mm

$$\text{Nachweis: } n \times F_{b,Rd} \geq F_{t,0,Rd,Zugdiagonale}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{b,Rd} = 113,3 \text{ kN} > F_{t,0,Rd,Zugdiagonale} = 81,4 \text{ kN} (\checkmark)$$

Nachweis wäre auch mit f_y und damit für den rein elastischen Bereich erbracht.
→ Keine plastischen Verformungen = lösbare Verbindung.

$F_{b,Rd}$	Grenzlochleibungskraft	
$F_{t,0,Rd,Zugdiagonale}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit der Zugdiagonale M16	
	hier $N_{Rd} = 81,4 \text{ kN}$ (s. Anhang, S. A-188)	
k_1	Beiwert zur Lochleibungskraft	(1,86)
	$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 \times e_2/d_0 - 1,7 \\ 1,4 \times p_2/d_0 - 1,7 \\ 2,5 \end{cases}$	(← entfällt, da nur 1 Bolzen)
e_2	Randabstand quer zur Krafrichtung	(21 mm)
d_0	Bohrungsdurchmesser	(16,5 mm)
t	Blechstärke	(15 mm)
p_2	Abstand der Schrauben untereinander und quer zur Krafrichtung	
α_b	Beiwert zur Lochleibungskraft	(0,65)
	$\alpha_b = \min \begin{cases} e_1/(3 \times d_0) \\ f_{ub}/f_u \\ 1 \end{cases}$	
e_1	Randabstand in Krafrichtung	(32 mm)
f_{ub}	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs	(16MnCr5 = 800 N/mm ²)
f_u	Zugfestigkeit des Anschlussbleches	(S355 = 490 N/mm ²)
γ_{M2}	Materialsicherheitsbeiwert	(1,25)

Anschluss Zuggurt, d = 20 mm

$$\text{Nachweis: } n \times F_{b,Rd} \geq F_{t,0,Rd}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

$$2 \times F_{b,Rd} = 379 \text{ kN} > F_{t,0,Rd} = 125,7 \text{ kN} (\checkmark)$$

Nachweis wäre auch mit f_y und damit für den rein elastischen Bereich erbracht.
→ Keine plastischen Verformungen = lösbare Verbindung.

$F_{b,Rd}$	Grenzlochleibungskraft	
$F_{t,0,Rd}$	Tragfähigkeit unter einer Zugbeanspruchung	
	hier = 125,7 kN (s. Anhang S. A-188)	
k_1	Beiwert zur Lochleibungskraft	(2,4)
	$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 \times e_2/d_0 - 1,7 \\ 1,4 \times p_2/d_0 - 1,7 \\ 2,5 \end{cases}$	
e_2	Randabstand quer zur Krafrichtung	(30 mm)
d_0	Bohrungsdurchmesser	(20,5 mm)
t	Blechstärke	(31 mm) = $t_{\text{Mittelblech}} + 2 \times t_{\text{Seitenblech}}$
p_2	Abstand der Schrauben untereinander und quer zur Krafrichtung	(60 mm)
α_b	Beiwert zur Lochleinungskraft	(0,33)
	$\alpha_b = \min \begin{cases} e_1/(3 \times d_0) \\ f_{ub}/f_u \\ 1 \end{cases}$	
e_1	Randabstand in Krafrichtung	(20 mm)
f_{ub}	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs	(16MnCr5 = 800 N/mm ²)
f_u	Zugfestigkeit des Anschlussbleches	(S355 = 490 N/mm ²)
γ_{M2}	Materialsicherheitsbeiwert	(1,25)

6) Bemessung des verstärkten Stabanschlusses auf Lochleibung unter Verwendung von Bolzen mit $d = 30$ mm, Festigkeit 8.8

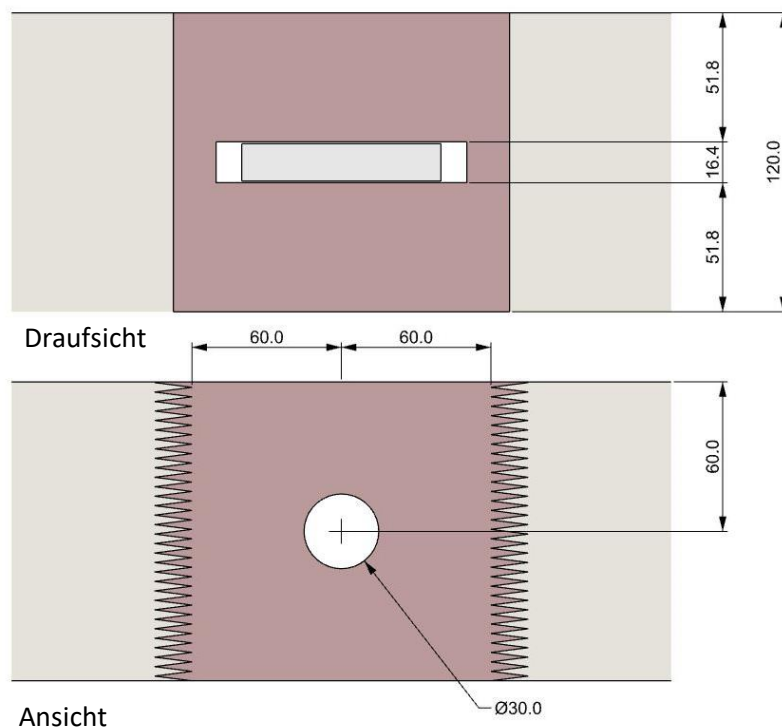


Abbildung 180: Abmessungen des verstärkten Stabanschlusses, Maße in [mm]

$d = 30 \text{ mm}$ (Stahl 16MnCr5) $n = 1$; $a_3 = 2,0 \times d$, $a_4 = 2,0 \times d$ / KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \cancel{\frac{F_{ax,Rk}}{4}} \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} + \cancel{\frac{F_{ax,Rk}}{4}} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(I) } 168,764 \text{ kN} \\ \text{(II) } \mathbf{111,640 \text{ kN}} \\ \text{(II) } 169,265 \text{ kN} \end{array}$$

$f_{h,1,k}^*$ **108,6 N/mm²** (vgl. Tabelle 32, S. A-3, für $a_3 = 2,0 \times d$)

t_1 51,8 mm

$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6} = 1.662.365 \text{ Nmm}$

$F_{ax,Rk}$ **0**

$f_{u,k}$ 800 N/mm² (Stahl 16MnCr5)

$$F_{Rk} = 2 \times 2F_{v,Rk} = 223,28 \text{ kN}$$

Nachweis für den ungünstigsten Fall: Knotenpunkt am Binderauflager

Nachweis: $F_{Rd,Anschluss} \geq F_{t,Rd,Zugdiagonale}$

$$223,28 \text{ kN} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = \mathbf{137,4 \text{ kN} > 81,4 \text{ kN} (\checkmark)}$$

Nachweis wäre auch mit f_y und damit für den rein elastischen Bereich erbracht.
→ Keine plastischen Verformungen = lösbare Verbindung.

7) Bemessung des Schlitzbleche auf Lochleibung

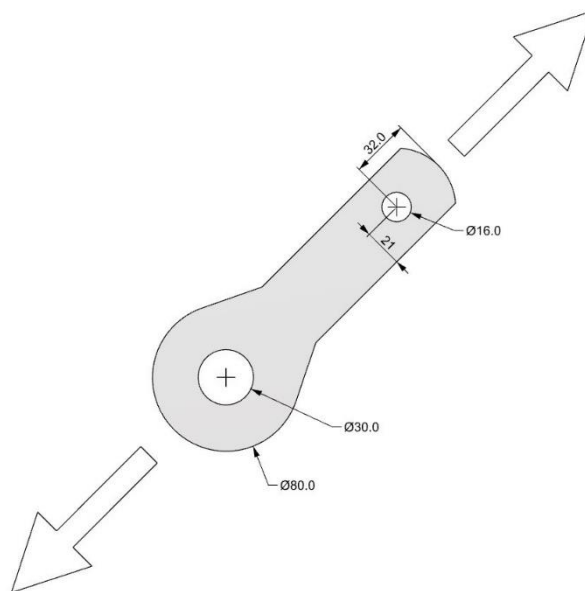


Abbildung 181: Geometrie Anschlussblech (S355)

Anschluss Zugdiagonale, d = 30 mm

$$\text{Nachweis: } n \times F_{b,Rd} \geq F_{t,0,Rd,Zugdiagonale}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}}$$

$$1 \times F_{b,Rd} = 152,1 \text{ kN} > F_{t,0,Rd,Zugdiagonale} = 81,4 \text{ kN} (\checkmark)$$

$F_{b,Rd}$	Grenzlochleibungskraft	
$F_{t,0,Rd,Zugdiagonale}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit der Zugdiagonale M16 hier $N_{Rd} = 81,4 \text{ kN}$ (s. S. A-188)	
k_1	Beiwert zur Lochleinungskraft	(1,97)
	$k_1 = \min \begin{cases} 2,8 \times e_2/d_0 - 1,7 \\ 1,4 \times p_2/d_0 - 1,7 \quad (\leftarrow \text{entfällt, da nur 1 Bolzen}) \\ 2,5 \end{cases}$	
e_2	Randabstand quer zur Krafrichtung	(40 mm)
d_0	Bohrungsdurchmesser	(30,5 mm)
t	Blechstärke	(15 mm)
p_2	Abstand der Schrauben untereinander und quer zur Krafrichtung	
α_b	Beiwert zur Lochleinungskraft	(0,44)
	$\alpha_b = \min \begin{cases} e_1/(3 \times d_0) \\ f_{ub}/f_u \\ 1 \end{cases}$	
e_1	Randabstand in Krafrichtung	(40 mm)
f_{ub}	Zugfestigkeit des Schraubenwerkstoffs	(16MnCr5 = 800 N/mm ²)
f_u	Zugfestigkeit des Anschlussbleches	(S355 = 490 N/mm ²)
γ_{M2}	Materialsicherheitsbeiwert	(1,25)

6.1.3.5 Knotendetail

I) Anschluss der einzelnen Module:

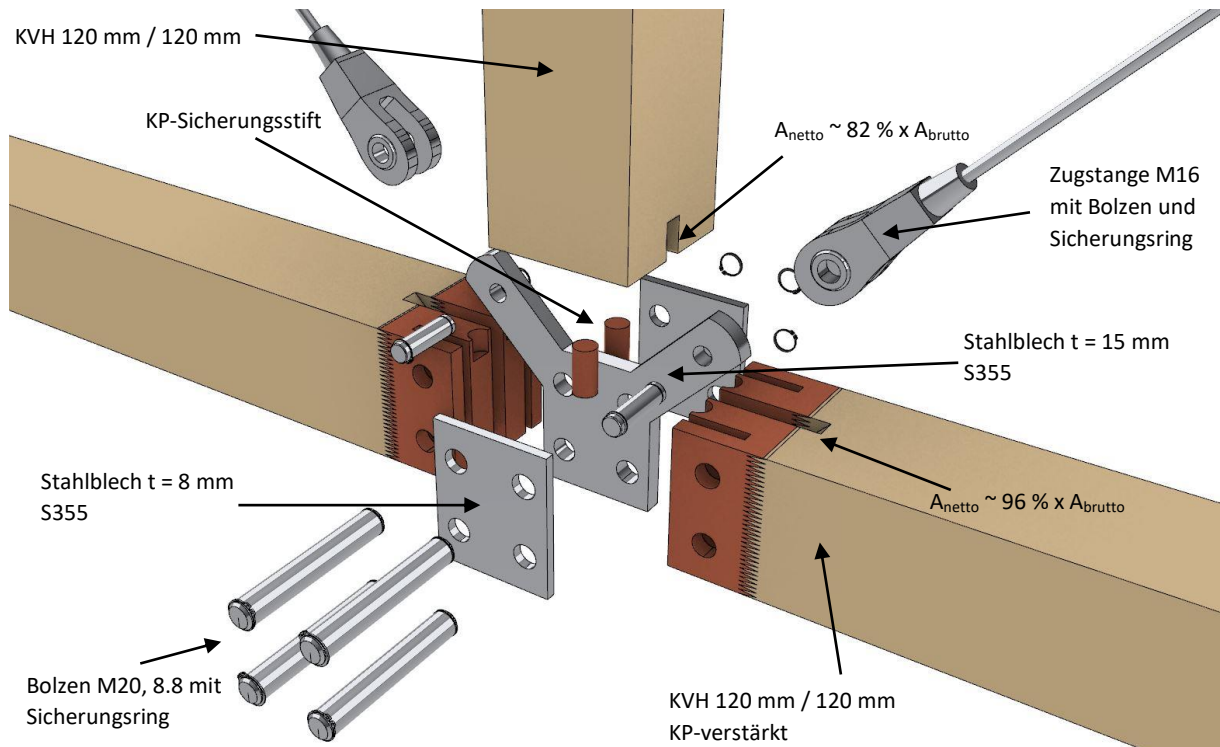


Abbildung 182: Explosionszeichnung Modulstoß, hier in Feldmitte

II) Stabanschluss innerhalb des Moduls:

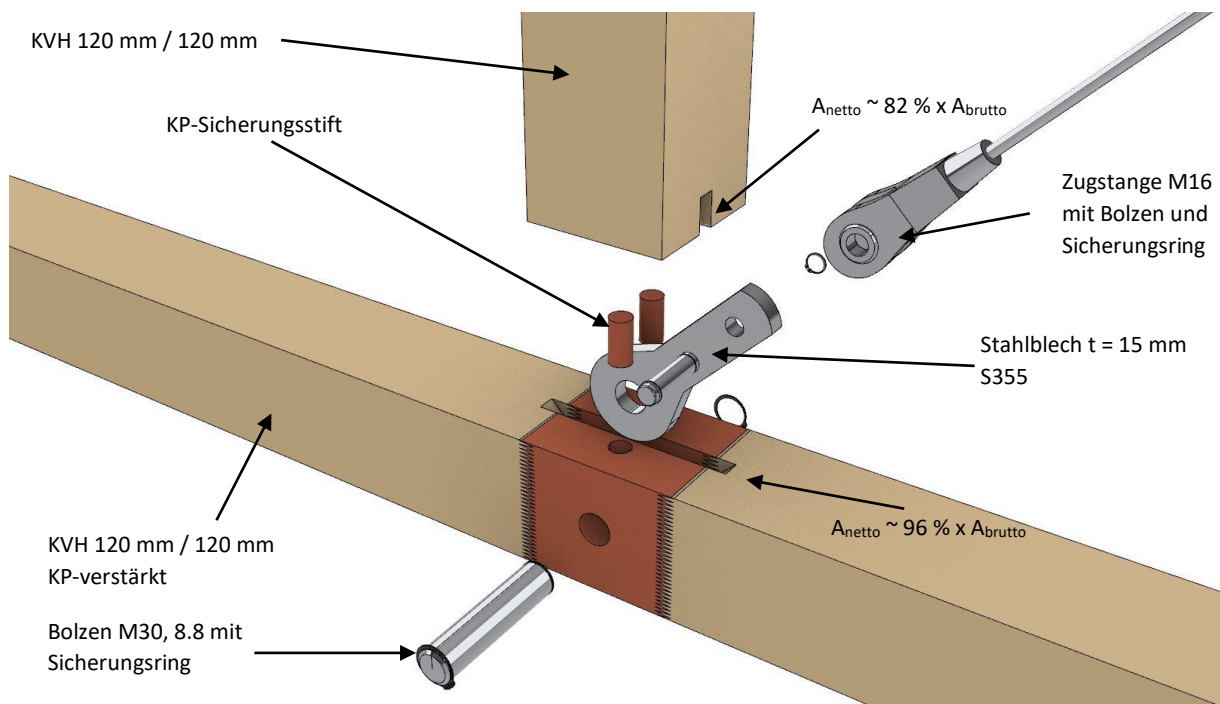


Abbildung 183: Explosionszeichnung Stabanschluss Pfosten und Diagonale, hier außerhalb der Feldmitte

Ansichten der unterschiedlichen Knotenpunkte

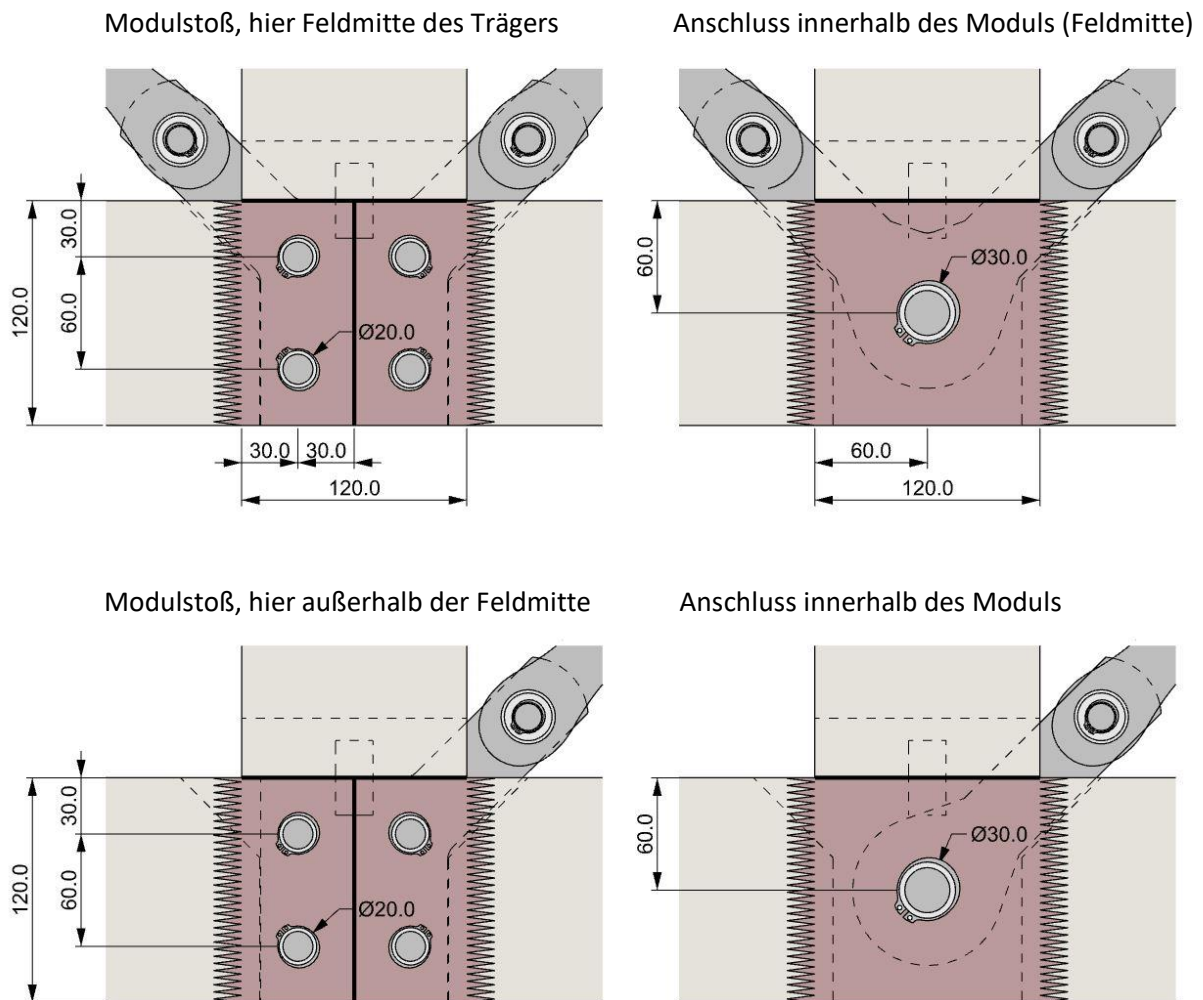


Abbildung 184: Ausbildungen der Knoten

6.1.3.6 Einsatzmöglichkeiten modular aufgebauter Fachwerkbinder

Für Reitsport-, Schulsport- (Spielhalle) und Tennishallen sind in Tabelle 23 übliche Mindestabmessungen aufgeführt.

Tabelle 23: Möglicher Trägereinsatz

Hallentyp	Abmessungen		Orientierung der Träger über kurze Seite (b)				Binderhöhe (Achshöhe)	Abweichung der Spannweite
	l [m]	b [m]	Spannweite [m]	Querschnitt	$q_d = 1,8 \text{ kN/m}^2$	$q_d = 5,5 \text{ kN/m}^2$		
Reitsporthalle	25	12,5	25	180 / 180	e = 4,72 m	e = 1,54 m	2,5 m	0,0%
	30	15	15	120 / 120	e = 4,85 m	e = 1,59 m	1,875 m	0,0%
	40 / 45	20	20	180 / 180	e = 6,79 m	e = 2,22 m	2,50 m	0,0%
	60	20	20	180 / 180	e = 6,79 m	e = 2,22 m	2,50 m	0,0%
	66	25	25	180 / 180	e = 4,72 m	e = 1,54 m	2,50 m	0,0%
Multifunktionshalle	27	15	15	120 / 120	e = 4,85 m	e = 1,59 m	1,875 m	0,0%
	45	27	27,5	180 / 180	e = 3,78 m	e = 1,24 m	2,50 m	+ 1,9%
	60	27	27,5	180 / 180	e = 3,78 m	e = 1,24 m	2,50 m	+ 1,9%
Spielhalle	44	22	22,5	180 / 180	e = 5,84 m	e = 1,91 m	2,50 m	+ 2,3%
	66	44	45	240 / 240	e = 3,67 m	e = 1,12 m	3,75 m	+ 2,3%
	88	44	45	240 / 240	e = 3,67 m	e = 1,12 m	3,75 m	+ 2,3%
Eishallen	60	30	30	240 / 240	e = 8,32 m	e = 2,72 m	3,75 m	0,0%
Tennishalle	36,6	18,3	18,75	120 / 120	e = 2,99 m	e = 0,98 m	1,875 m	+ 2,5%
	36,6	36,6	37,5	240 / 240	e = 4,40 m	e = 1,44 m	3,75 m	+ 2,5%
	54,9	36,6	37,5	240 / 240	e = 4,40 m	e = 1,44 m	3,75 m	+ 2,5%

Den jeweiligen Spannweiten sind Trägerquerschnitte sowie Binderabstände in Abhängigkeit der Lastgröße zugeordnet. Die Tabelle verdeutlicht, dass mit den unter Abbildung 176, S. 186 und Tabelle 22, S. 187 aufgeführten Querschnitten alle üblichen Hallenspannweiten ausgeführt werden können.

6.2 Gleitfeste Anschlüsse aus KP

Um Bauteile einfach und sicher miteinander fügen zu können sind ausreichend große Bauteiltoleranzen erforderlich. Zwar lässt die hohe Formtreue von KP eine besonders präzise Bearbeitung des Materials zu - weil kurzfristige klimatische Veränderungen keinen Einfluss auf die Geometrie der KP-Verstärkung haben - allerdings können Formveränderungen der nativen Hölzer zwischen den verstärkten Stäben dazu führen, dass die Montage aller Bauteile erschwert bis ausgeschlossen wird. Für einen verstärkten Stab der Länge 2,50 m läge nach DIN 18203-3, 2008, S. 4 die Längentoleranz zwischen zwei Bohrungen bei $\pm 0,1\%$ und damit bei $\pm 2,5$ mm. Zum Ausgleich dieser Toleranzen wurde für die unter Kap. 6.1.3.3, S. 184 entwickelte Fachwerkstruktur der Diagonalstab als Stahlstab vorgesehen, dessen Länge über Gewindegänge im Bereich der Stabanker reguliert und eine Formveränderung infolge klimatischer Beanspruchungen ausgeglichen werden kann.

Fachwerkträger mit verstärkten Stäben können demnach nur dann realisiert werden, wenn entweder durch das Aufbringen hydrophobierender Anstriche die Maßhaltigkeit der Modulstäbe gewährleistet wird, ausreichend große Toleranzen im Anschlussbereich vorgesehen werden - was im Umkehrschluss aber auch bedeutet, dass die Tragwerksform einer großen Anfangsdurchbiegung unterliegt - oder mindestens ein Tragelement die Möglichkeit der Längenregulierung mit sich bringt.

Im diesem Kapitel wird eine weitere Möglichkeit zum Toleranzausgleich durch die Ausbildung gleitfester Verbindungen beschrieben.

KP weist in alle 3 Raumrichtungen deutlich höhere mechanische Festigkeiten auf als natives Holz. Vergleicht man die charakteristische Zugfestigkeit und die charakteristische Druckfestigkeit von KP BE335-1 67 % L / 33 % Q in der Plattenebene in Richtung der Hauptfurnierorientierung mit der charakteristischen Zugfestigkeit und charakteristischen Druckfestigkeit von nativen Holz der Festigkeitsklasse C24 in Faserlängsrichtung, so liegen die Festigkeiten bei KP um etwa das 10-fache höher. Die charakteristische Druckfestigkeit von KP quer zur Plattenebene entspricht ca. dem 100-fachen der Querdrukfestigkeit von Nadelholz C24, vgl. Tabelle 24.

*Tabelle 24: Überblick über ausgewählte mechanische Kennwerte von Fichte und KP.
(*) : BE 335-1 67 % L / 33 % Q*

Eigenschaft [N/mm ²]	Fichte (f _{mean})	Fichte C24 (f _k)	BE 335-1* (f _{mean})	BE 335-1* (f _k)
Zugfestigkeit	95	14	162	147
Druckfestigkeit	45	21	210	202
Druckfestigkeit ⊥	11	2,5	250	230

Aufgrund der im Vergleich zu Holz enormen Druckfestigkeit quer zur Plattenebene ist es denkbar, gleitfeste Bauteilverbindungen unter Verwendung hochfester Schrauben auszubilden und damit mögliche Verbindungen aus dem Stahlbau zu adaptieren. Gleitfeste Verbindungen können zu einer deutlichen

Tragfähigkeitserhöhung im Bereich der Bauteilanschlüsse im Vergleich zu nicht gleitfesten Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln, wie Stabdübel oder Bolzen mit vergleichbaren Durchmessern, führen. Stiftförmige Verbindungsmittel übertragen die Kräfte mittels Lochleibungspressung und führen zu einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung im Bereich der Bohrung, während gleitfeste Verbindungen Flächenreibungskräfte in der Scherfuge aktivieren und zu einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung führen (vgl. Abbildung 185 & Abbildung 186).

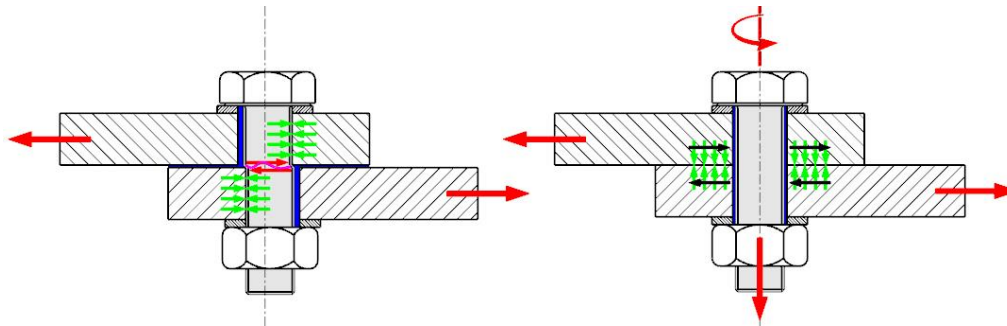


Abbildung 185: Wirkprinzip nicht vorgespannter und vorgespannter Schraubenverbindungen

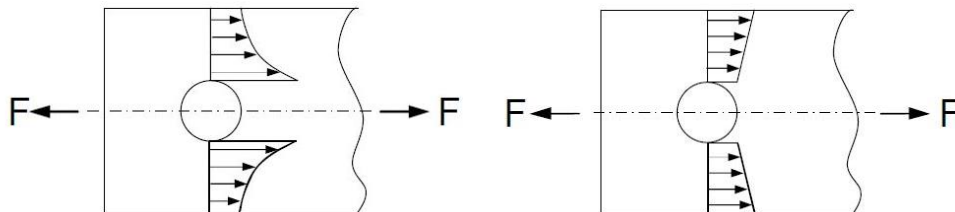


Abbildung 186: Spannungen in Blechen bei gleitfesten Verbindungen (rechts) und Scher-Lochleibungsverbindungen (links)

Kraftabtrag über Lochleibungspressung

Bei einer Schraubenverbindung ohne Vorspannung verschieben sich aufgrund notwendiger Bohrlochtoleranzen beide Bauteilquerschnitte zunächst gegeneinander, bis die Bohrungswandungen der Fügeteile gegen den Schraubenmantel stoßen (vgl. Abbildung 185, links). Anschließend werden Kräfte durch Lochleibungspressung und damit als Druckkräfte von der Bohrungswandung des einen Fügeteilpartners auf die Mantelfläche der Schraube bzw. auf das Schraubengewinde übertragen, dann durch Scherkräfte im Schraubenquerschnitt auf die gegenüberliegende Mantelfläche der Schraube weitergeleitet und anschließend von dieser in die Bohrungswandung des anderen Fügeteilpartners eingeleitet. Als Versagensarten können die unter Kap. 5.2, Abbildung 138 aufgeführten Versagensarten eintreten.

Kraftabtrag über Flächenreibung

Bei Schraubenverbindung mit vorgespannten Schrauben werden die Fügeteilflächen gegeneinander gepresst. Dadurch entstehen Haftreibungskräfte (Kraftschluss) in der Kontaktfläche der Fügeteilpartner, die von der Höhe der Vorspannung und der Beschaffenheit der Oberflächen abhängen. Die Kräfte in den Fügeteilpartnern werden hier weder über Lochleibungspressung, noch durch Scherbeanspruchung, sondern rein durch Haftreibung der Oberflächen abgetragen (vgl. Abbildung 185, bzw. Abbildung 186, rechts).

Es können die drei nachfolgenden Versagensarten auftreten:

- Durchstanzen der Verbindungsteile, infolge der Überschreitung der Querdrukfestigkeit der Fügeteilquerschnitte
- Reißen der Schraube, infolge der Überschreitung der Schraubenzugfestigkeit

- c) Überschreiten der Haftreibungskraft → anschließend: Gleiten bis Lochleibungskräfte aktiviert werden.

Im Vergleich zu Verbindungen mit nicht vorgespannten Schrauben bieten Verbindungen mit vorgespannten Schrauben zwei wesentliche Vorteile:

a) Steigerung der Tragfähigkeit:

Aufgrund großflächiger Krafteinleitung über Haftreibung wird die Verbindung im Idealfall weder auf Lochleibung- noch auf Abscheren beansprucht. Auch Spaltbeanspruchungen und Blockscherbeanspruchungen der Querschnittsfläche vor der Bohrung werden nicht hervorgerufen. Die Tragfähigkeit der Verbindung kann gesteigert werden.

b) Steigerung der Systemsteifigkeit:

Durch das Aktivieren von Haftreibung zwischen den Fügeiteiloberflächen kommt es zu keiner Anfangsverschiebung der Fügeile infolge Montagetoleranzen. Weiterhin wird die Nachgiebigkeit des Bauteilanschlusses reduziert, da zum einen Lochleibungsbeanspruchungen ausgeschlossen werden, andererseits durch die Überlappung der Fügeile eine größere Querschnittsfläche im Kontaktbereich und damit verbunden eine höhere geometrische Steifigkeit vorhanden ist.

Vorspanneffekte von Schrauben in nativem Holz sind quer zur Faser so gut wie nicht möglich, da die Querdruckfestigkeit von Holz im Vergleich zur Zugfestigkeit nur 5 % - 10 % beträgt und damit verschwindend gering ist. Dennoch wird beispielsweise bei Bolzenverbindungen die Tragfähigkeit des Anschlusses dadurch erhöht, dass durch ausreichend große Unterlegscheiben eine gewisse Klemmkraft erzeugt werden kann. „Diese *Klemmkraft* bewirkt, dass in der Kontaktfuge eine Reibungskraft in Richtung der Abscherkraft aktiviert wird. (...) Diese Reibungskraft bewirkt eine Erhöhung der Abscherkraft“ (Colling, 2012, S. 194). (Einhängeneffekt).

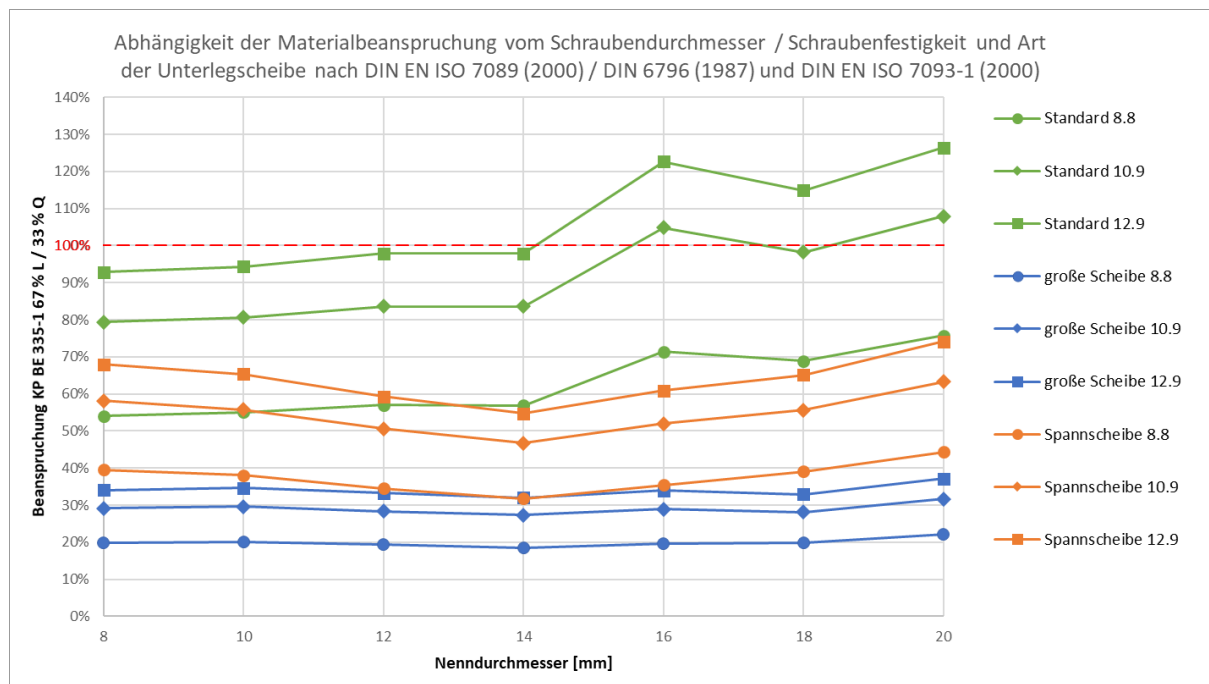


Abbildung 187: Abhängigkeit der Materialbeanspruchung vom Schraubendurchmesser / Schraubenfestigkeit und Art der Unterlegscheibe

Abbildung 187, S. 200 gibt die Beanspruchung des KPs bei Anschlüssen mit vorgespannten Schrauben (Tabelle 25) in Abhängigkeit des Schraubendurchmessers, der Schraubenfestigkeit und der Art der Unterlegscheibe wieder. Bei der Verwendung von Flachscheiben nach DIN EN ISO 7089 (2000) nimmt die Beanspruchung des KPs auf Querpressung mit steigendem Schraubendurchmesser zu. Bei der Verwendung von Spannscheiben nach DIN 6796 (1987) und Scheiben mit großem Außendurchmesser nach DIN EN ISO 7093-1 (2000) bleibt die Beanspruchung unabhängig vom Schraubendurchmesser in etwa gleich groß. Geringste Materialbeanspruchungen liegen beim Einsatz großer Scheiben vor, während der Einsatz von Standardflachscheiben zu einer verhältnismäßig großen Materialbeanspruchung führt.

Tabelle 25: Schraubenvorspannkraft F_V und des Anziehmomentes M_A

Klasse	Schraube													
	M8		M10		M12		M14		M16		M18		M20	
	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]	F_V [kN]	M_A [Nm]
8.8	18,1	27,3	28,8	54	41,9	93	57,5	148	78,8	230	99	329	127	464
10.9	26,6	40,1	42,2	79	61,5	137	84,4	218	115,7	338	141	469	181	661
12.9	31,1	46,9	49,4	93	72	160	98,8	255	135,4	395	165	549	212	773

Innerhalb dieser Arbeit wurde in verschiedenen Versuchsreihen der Effekt durch das Vorspannen hochfester Schrauben der Festigkeitsklasse 8.8 (M8 / M10 / M20) auf die Tragfähigkeit von Zangenanschlüssen mit Kunstharzpressholzquerschnitten untersucht.

6.2.1 Festigkeitsuntersuchungen

6.2.1.1 Anschluss mit hochfesten Schraube M20, 8.8 ⁶⁰

Im ersten Schritt wurde das Tragverhalten von Zangenanschlüssen aus nativen Fichtenholzquerschnitten und KP-Querschnitten an ein mittiges glattes Stahlblech, unter Verwendung von Gewindeschrauben M20, 8.8 und ohne Vorspannung der Schrauben, untersucht. Die Randabstände der Verbindungsmittel lagen jeweils bei $a_4 = 1,5 \times d$ und $a_3 = 2,0 \times d$. Die KP-Stärke lag bei 15 mm.

Zunächst wurde die Tragfähigkeit des Anschlusses mittels der Johansen-Gleichungen (vgl. S. 142 und S. 165) berechnet.

Die bezogene mittlere und charakteristische Lochleibungsfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurde in Kap. 5.6.2 bestimmt. Bei glattschaftigen Verbindungsmittel mit einem Durchmesser von 20 mm und den Randabständen $a_4 = 1,5 \times d$ und $a_3 = 2,0 \times d$ ist:

$$f_{h,k}^* = 117 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Tabelle 32 im Anhang, S. A-3}).$$

Die charakteristische Lochleibungsfestigkeit von Fichte C24 für glattschaftigen Verbindungsmittel mit einem Durchmesser von 20 mm lässt sich mit:

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01 \times d) \times p_k$$

zu $f_{h,C24,k} = 23,0 \text{ N/mm}^2$ bestimmen.

Aufgrund der Unterschreitung der Mindestrandabstände der Bohrung von $7 \times d$ in Fichtenholz am freien Stirnende, muss die Lochleibungsfestigkeit abgemindert werden. Nach Fahlbusch (1951) (vgl.

⁶⁰ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.6.1, S. A-40

Kap. 5.4, Abbildung 142, S. 146) reduziert sich die Tragfähigkeit von Anschlüssen mit stiftförmigem Verbindungsmittel in Kiefernholz bei einem Randabstand a_3 von $2,0 d$ gegenüber einem Randabstand von $7,0 d$ um ca. 40 %.

Für den untersuchten Anschluss (vgl. Abbildung 188) berechnet sich die charakteristische Tragfähigkeit ohne die Vorspannung der Schrauben dann:

- für KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q zu: **$F_k = 70 \text{ kN}$**
- und für Fichte C24 zu: **$F_k = 8,3 \text{ kN}$**
(beinhaltet eine Abminderung von 40 % aufgrund der Unterschreitung des Mindestabstandes)

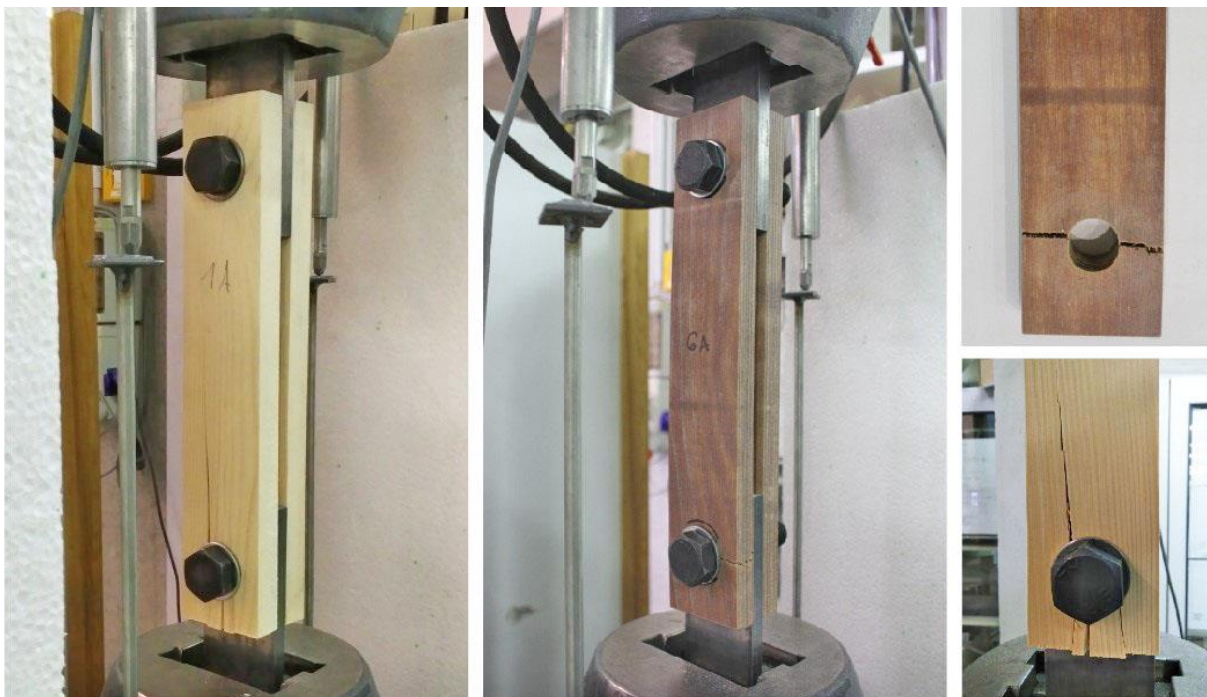


Abbildung 188: Versuchsaufbau zur Ermittlung von Kennwerten vorgespannter Stahlschrauben als Verbindungsmittel zwischen KP und Stahlblech, als Referenz wurden Fichtenquerschnitte geprüft ($t = 15 \text{ mm}$).

Mit dem Zangenanschluss aus nativem Fichtenholz (ohne Vorspannung) konnte eine mittlere Tragfähigkeit von 10,4 kN ermittelt werden und eine charakteristische Tragfähigkeit der Stichprobe von 4,5 kN. Hierbei ist zu beachten, dass lediglich vier Prüfkörper geprüft wurden. An drei der vier Prüfkörper lag die Tragfähigkeit zwischen 8,3 und 9,3 kN. Am vierten Prüfkörper wurde eine Tragfähigkeit von 15,7 kN erreicht. Durch diesen *Ausreißer* und durch die geringe Anzahl der Prüfkörper liegt innerhalb des Prüfkollektivs eine verhältnismäßig große Streuung vor. Aus diesem Grund fällt die charakteristische Tragfähigkeit der Probe gering aus. Ohne den Ausreißer liegen die 3 Tragfähigkeitskennwerte in guter Übereinstimmung mit den durch die Johansen-Gleichungen und unter Berücksichtigung des geringen Randabstandes berechneten Tragfähigkeiten.

Mit dem Zangenanschluss aus KP (ohne Vorspannung) konnte eine mittlere Tragfähigkeit von 70,6 kN ermittelt werden und eine charakteristische Tragfähigkeit der Stichprobe von 58,4 kN. Unter Berücksichtigung des geringen Prüfumfanges von nur vier Prüfkörpern liegen die ermittelten Tragfähigkeiten,

mit einer Abweichung von 17 %, in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus den Berechnungen mit den Johansen-Gleichungen. Gegenüber einem Zangenanschluss aus Fichtenholz C24 stieg die mittlere Tragfähigkeit eines Zangenanschlusses aus KP BE335-1 67 % L / 33 % Q ohne den Einsatz vorgespannter Schrauben um das 6,8-fache an.

Am KP-Zangenanschluss stieg die mittlere Tragfähigkeit unter Verwendung vorgespannter Schrauben gegenüber dem Einsatz nichtvorgespannter Schrauben um fast das 1,4-fache. Mit der Erhöhung der Haftreibung, durch den Einsatz von Sandpapierunterlegscheiben in den Scherflächen zwischen Stahlblech und der KP-Querschnitte, konnte die mittlere Tragfähigkeit um ca. das 1,5-fache gesteigert werden (vgl. Abbildung 189).

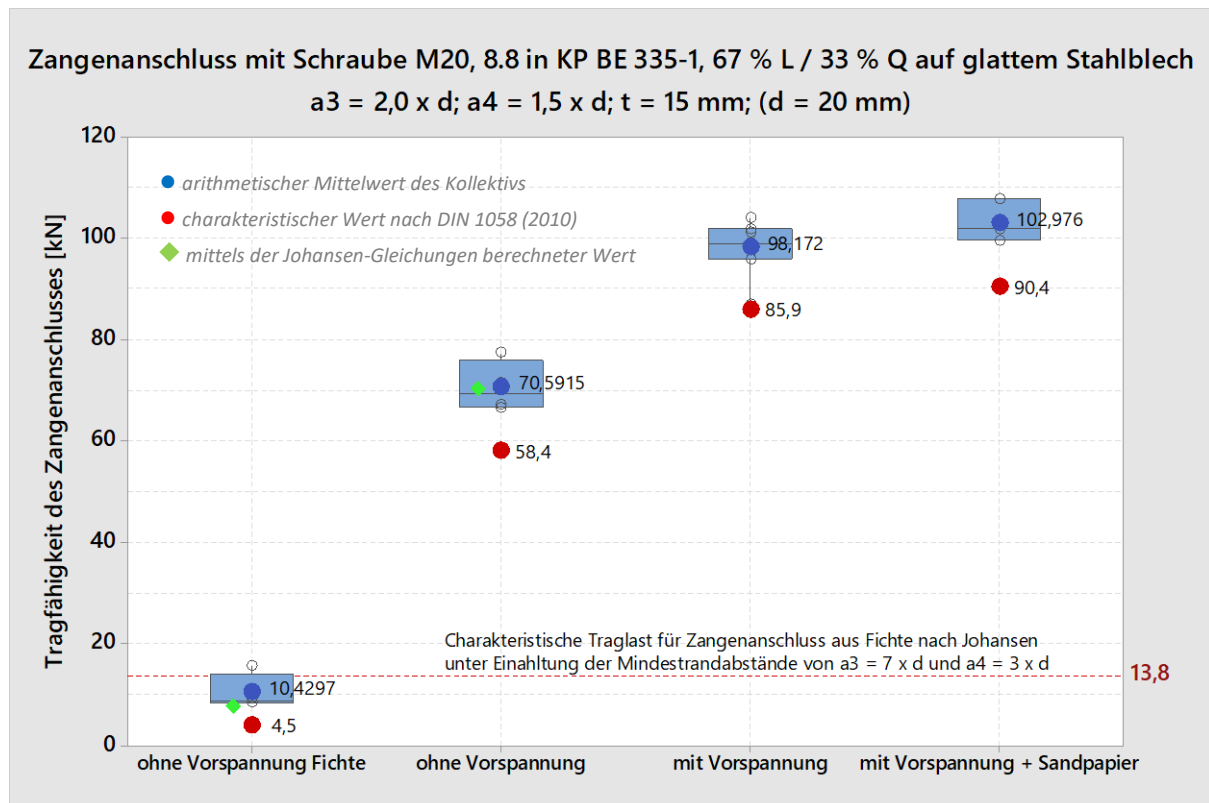


Abbildung 189: Tragfähigkeit eines Zangenanschlusses mit Schrauben M20

Wie in den Kraft-Weg-Diagrammen (vgl. Abbildung 190, S. 204) zu erkennen ist, steigt die Steifigkeit (Steigung der Kurven) einer Bolzenverbindung mit vorgespannten Schrauben in KP signifikant gegenüber einer Bolzenverbindung ohne vorgespannte Schrauben in KP wie auch gegenüber einer Bolzenverbindung ohne vorgespannte Schrauben in Fichte an. Darüber hinaus steigern sich die Bruchlasten deutlich. Während bei den Verbindungen mit nichtvorgespannten Schrauben der Bruch spröde, ohne Vorankündigung und spontan eintritt, kündigt sich bei vorgespannten Schrauben der Bruch - aufgrund starker Verformungen - im Vorfeld an. Diese Verformungen lassen sich mit dem Verlust der Haftreibung und dem beginnenden Gleiten der Schraube im Bohrloch erklären. Die Querschnitte gleiten solange gegeneinander, bis das Schraubengewinde gegen die Bohrlochwandung trifft. Ab dann wird zusätzlich die Lochleibung beansprucht.

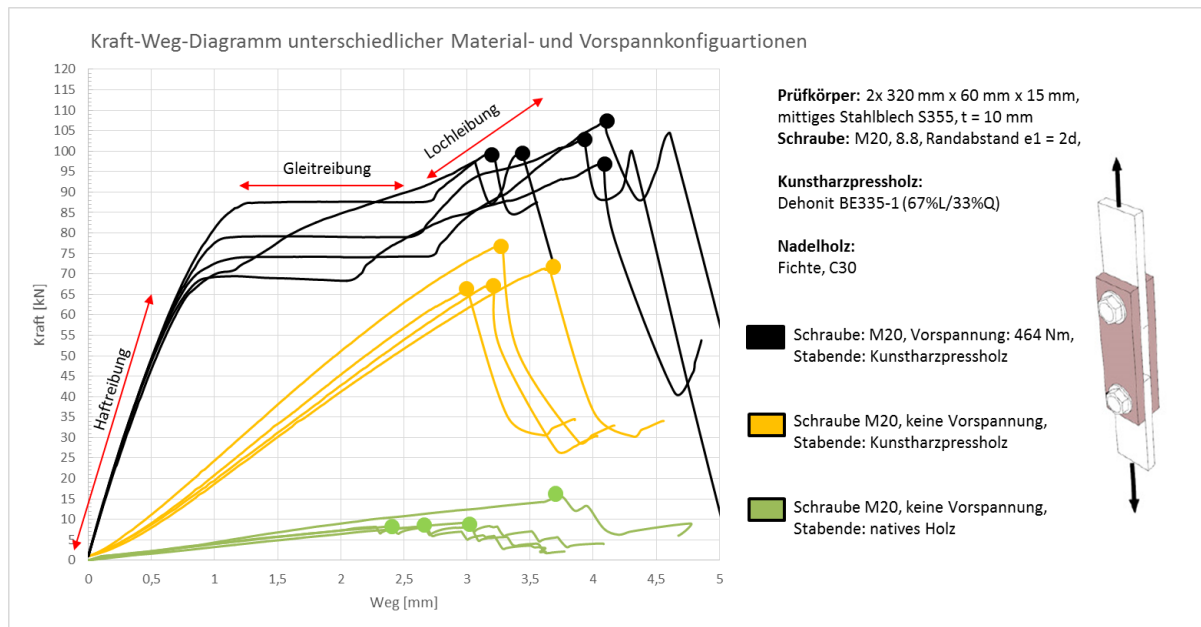


Abbildung 190: Kraft-Weg-Diagramme unterschiedlicher Material- und Vorspannkonfigurationen, bei gleicher Prüfkörpergeometrie.

6.2.1.2 Anschluss mit hochfesten Schraube M8, 8.8 ⁶¹

Um gleitfeste Verbindungen ausbilden zu können, muss sichergestellt werden, dass die Vorspannung infolge Materialkriechens nicht abgebaut wird oder, dass das Materialkriechen so gering ist, dass eine Restvorspannung aufrecht erhalten bleibt. Hamann & Kubowitz (2011) verglichen das Kriechverhalten von KP in Plattenebene mit dem Kriechverhalten von Fichte und Lärche im Zeitraum von 105 Tagen in Nutzungsfall 1 (Langzeitlagerung bei 25 °C, 40 % RH und anschließender 8-tägiger Lagerung bei 20 °C, 65 % RH) und in Nutzungsfall 2 (4-wöchige Lagerung bei 20 °C, 65 % RH). Bei einer Belastung von 25 % der mittleren Bruchlast ermittelten sie für Nutzungsfall 1 nachfolgende Kriechzahlen:

Tabelle 26: Kriechzahlen von KP, Fichte und Lärche

KP 25 %, Nutzungsfall 1	Fichte 25 %, Nutzungsfall 1	Lärche 25 %, Nutzungsfall 1
0,42 (~ 33 % Schwankung)	0,35 (~ 50 % Schwankung)	0,26 (~ 40 % Schwankung)

Bei einer Belastung von 25 % der Bruchlast lag die Kriechzahl bei KP nach 105 Tagen in Nutzungsfall 1 bei 0,42. Sie liegt damit 20 % oberhalb der Kriechzahl von Fichte und 60 % oberhalb der Kriechzahl von Lärche. Nach 105 Tagen zeigte sich, dass die Kriechzahlen der KP-Proben nach 105 Tagen noch stark anstiegen, während der Anstieg der Kriechzahlen der nativen Hölzer im Vergleich dazu äußerst gering war.

Die Ergebnisse aus der zuvor zitierten Versuchsreihe können nicht auf die Situation des gleitfesten Anschlusses mit vorgespannten Schrauben in KP-Querschnitten übertragen werden. Es muss beachtet werden, dass KP in unterschiedlichen Qualitäten, abhängig von der Stärke und Ausrichtung der Ausgangsfurniere, dem Tränkungsgrad und weiteren Prozessparametern, hergestellt werden kann. Für die Ermittlung der Kriechzahlen wurde beispielsweise Dehonit A740-1 eingesetzt, während die im Rahmen

⁶¹ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.6.2, S. A-42

dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen an Dehonit BE 335-1 realisiert wurden. Außerdem wurden die Kriechzahlen durch Biegung in Richtung der Plattenebene ermittelt. Die Vorspannwirkung durch hochfeste Schrauben ist jedoch quer zum Plattenwerkstoff orientiert.

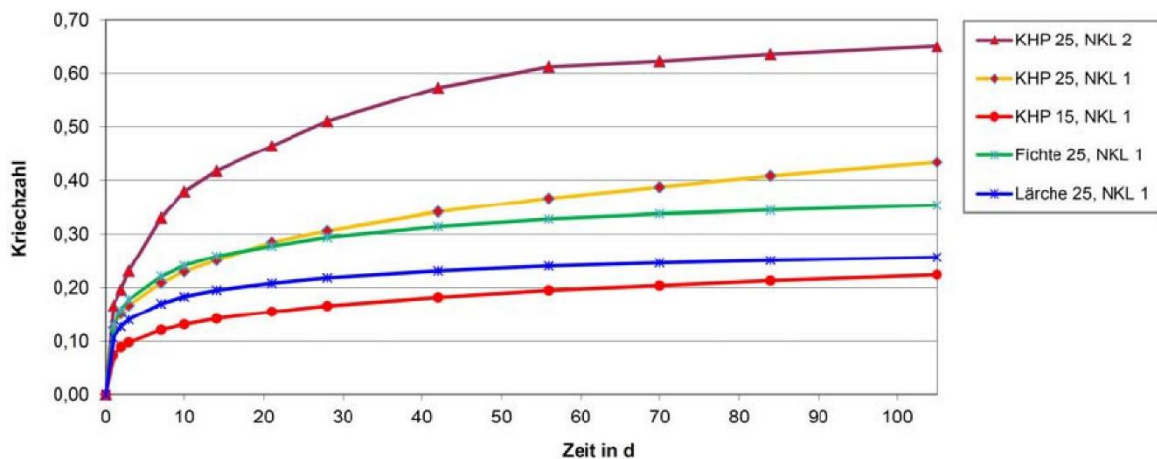


Abbildung 191: Vergleich von Kriechzahlen von Fichte, Lärche und KP

Um die Leistungssteigerung durch eine Schraubenvorspannung zu quantifizieren und um die Auswirkungen von Kriecheffekten zu beurteilen, wurden Untersuchungen an gleitfesten Verbindungen unmittelbar nach dem Vorspannen, 35 Tage nach dem Vorspannen und 105 Tage nach dem Vorspannen der Schrauben durchgeführt. Das Lochspiel lag bei ca. 0,6 mm. Zum Einsatz kamen Schrauben M8, 8.8. Mit der Vorspannung der Schrauben wurde eine Querpressung von ca. 50 % der Querdruckfestigkeit erzeugt (vgl. Abbildung 187, S. 200).

Für den untersuchten Anschluss berechnet sich die charakteristische Tragfähigkeit ohne die Vorspannung der Schrauben nach den Johansen-Gleichungen für KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q zu:

$$F_k = 17,4 \text{ kN}^{62}$$

Am Zangenanschluss ohne vorgespannte Schrauben wurde die charakteristische Tragfähigkeit der Stichprobe mit 16,4 kN ermittelt. Dieser Wert liegt damit in guter Übereinstimmung mit den Berechnungsergebnissen unter Anwendung der Johansen-Gleichungen.

Das Vorspannen der Schraube führte zu einer Steigerung des Mittelwertes der Tragfähigkeit um etwa 50 % gegenüber nicht vorgespannten Schrauben. Dies entspricht in etwa der Leistungssteigerung die an Schrauben M20, 8.8 bereits dokumentiert werden konnte (vgl. Kap. 6.2.1, S. 201 ff.). Dabei fiel die Streuung der Kennwerte bei vorgespannten Schrauben größer aus als bei nicht vorgespannten Schrauben, sodass die Steigerung der entsprechenden charakteristischen Kennwerte der Stichprobe im Vergleich zum Mittelwert nicht im gleichen Verhältnis ausfiel. Jedoch nahm die Streuung mit zunehmender Vorspanndauer kontinuierlich ab (vgl. Abbildung 192, S. 206).

Die Mittelwerte der drei Versuchschargen vorgespannter Schrauben - mit 27,55 kN für $t = 0$ d, mit 28,05 kN für $t = 35$ d und mit 28,36 kN für $t = 105$ d - schwankten nur geringfügig. Es konnte demnach kein Abfall der Tragfähigkeit mit Zunahme der Vorspanndauer verzeichnet werden (vgl. Abbildung 192). Stattdessen zeigte sich mit Zunahme der Vorspanndauer eine Abnahme der Streuung der Ergebnisse, sodass die charakteristische Tragfähigkeit der Stichprobe mit zunehmender Vorspanndauer anstieg.

⁶² Für die Berechnung wurde der Flankendurchmesser der Schraube angesetzt.

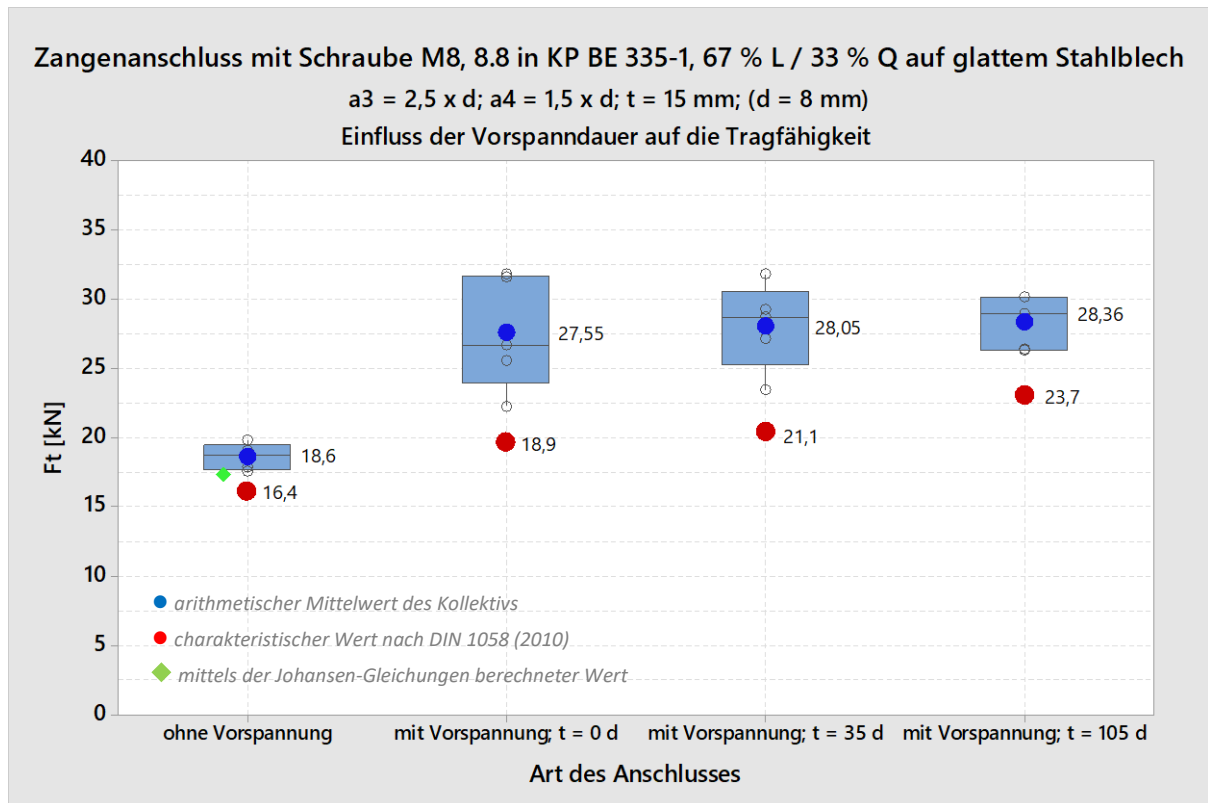


Abbildung 192: Zangenanschluss mit KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q auf glattem Stahlblech

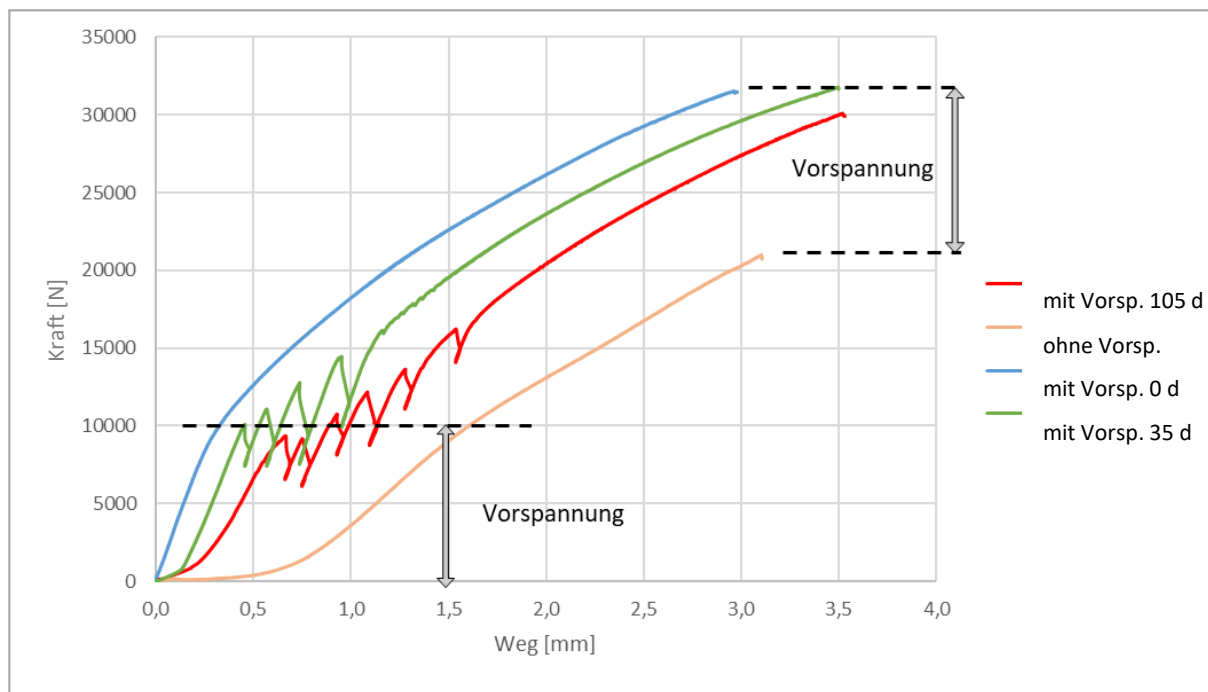


Abbildung 193: Kraft-Weg Diagramm

Im Kraft-Weg Diagramm zeigte sich ein abweichendes mechanisches Verhalten der Prüfkörper, deren Schrauben vorgespannt und nach 35 Tagen bzw. vorgespannt und nach 105 Tagen, einer Prüfung unterzogen wurden, gegenüber den Prüfkörpern, die unmittelbar nach dem Vorspannen geprüft wurden und gegenüber den Prüfkörpern ohne den Einsatz vorgespannter Schrauben. Mit den vorgespannten Schrauben (vgl. Abbildung 193 grüne, blaue und rote Kurve) stieg die Kraft-Weg-Kurve bis 10.000 N

zunächst steiler an als die Kraft-Weg-Kurven nicht vorgespannter Schrauben (vgl. Abbildung 193; orangefarbene Kurve), was auf den Haftreibungseffekt in der Scherfuge zwischen KP und Stahl zurückzuführen ist. Ab ca. 10 kN wird die Haftreibung überwunden und die KP-Querschnitte als auch die Stahlplatte werden dann zusätzlich auf Lochleibung beansprucht. Die Steigung der Kurven der Prüfkörper ohne Schraubenvorspannung und die Steigung der Kurven der Prüfkörper mit Schraubenvorspannung zum Zeitpunkt $t = 0$ d verläuft nach der Überwindung der Haftreibung dann nahezu parallel. Der Bruch der Prüfkörper mit vorgespannten Schrauben erfolgt etwa 10 kN oberhalb des Bruchniveaus nicht vorgespannter Schrauben. Die Leistungssteigerung beruht demnach auf dem Anteil der Vorspannwirkung; dieser bleibt im Bauteil auch nach dem Gleiten gespeichert.

Nach einer Dauer der Schraubenvorspannung von 35 Tagen und 105 Tagen tritt ab ca. 10 kN ein *gezackter* Verlauf der Kraft-Weg-Kurve ein. Dieser Verlauf trat bei allen Prüfkörpern der Reihe auf und war akustisch durch lautes „Knacken“ während der Versuchsdurchführung wahrnehmbar.

Im Gegensatz zu den Prüfkörpern, die unmittelbar nach der Schraubenvorspannung geprüft wurden, verlief das Gleiten nach Überwindung der Haftreibung nicht kontinuierlich. Der gezackte Bereich der Kurve beschreibt mit jeder einzelnen Zacke den vollständigen Verlust von Haft- und Gleitreibung. Die Querschnitte verschieben sich für einen kurzen Augenblick und eine kurze Wegstrecke von ca. 0,1 mm gegeneinander, bis wieder ein Reibungseffekt der Oberflächen eintritt und es zu einem erneuten Kraftanstieg kommt.

6.2.1.3 Anschluss mit hochfesten Schrauben M8, 8.8 und M10, 8.8 auf gerändelter Oberfläche ⁶³

In den beiden zuvor beschriebenen Versuchsreihen wurde das Potential vorgespannter Schrauben in Bauteilanschlüssen aus KP vorgestellt. Es wurde nachgewiesen, dass die Vorspannkraft auch nach 105 Tagen noch vorhanden war (s. S. 206). Es wurde aufgezeigt, dass durch Vergrößerung der Haft- und Gleitreibungskoeffizienten zwischen Stahl und KP die Tragfähigkeiten gesteigert werden konnten (s. S. 202). Nachfolgend wird die Möglichkeit der Steigerung der Haft- und Gleitreibung durch das Rändeln der Stahloberflächen untersucht.

Neben dem Rändeln der Stahlplatten können die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten zwischen Stahl und KP durch höhere Vorspannung der Schrauben, durch Oberflächenbearbeitung, wie z. B. das Sandstrahlen als auch durch Veränderung des Durchmessers der Unterlegscheiben erhöht werden. Höhere Vorspannung der Schrauben erhöhen jedoch die Wahrscheinlichkeit des Einsetzens möglicher Kriechverformungen, die zum Abfall der Vorspannwirkung beitragen können. Aus Abbildung 187, S. 200 kann entnommen werden, dass ab einem Schraubendurchmesser von $d = 16$ mm die Vorspannung der Schrauben mit den Schraubenfestigkeiten 10.9 und 12.9 zu Druckbeanspruchungen führen, die größer als die Materialfestigkeit des KPs ist. Aus diesem Grund ist es sinnvoll die Vorspannung gering zu halten und die Beschaffenheit der Oberfläche zu verändern.

Das Anrauen der Stahloberfläche trägt zur Steigerung der Haftreibung bei. Mit einem Normrändel nach DIN 82 (1973) kann - im Gegensatz zum Sandstrahlen - eine reproduzierbare Rauheit der Oberfläche garantiert werden. Für die nachfolgenden Versuche wurde auf die Oberfläche der Stahlbleche ein Normrändel RGV 1.0, 90°, also ein Links-Rechts-Rändel mit vertieften Spitzen und einem Spitzenabstand von 1,0 mm bei einer Flankenneigung von 90° aufgebracht. An die gerändelte Oberfläche der

⁶³ vgl. Prüfungen im Anhang, Kap. A-3.6.2, S. A-42

Stahlbleche wurden die KP-Querschnitte mit hochfesten Schrauben M8 und M10 angezogen (vgl. Abbildung 194). Die Vorspannung wurde mittels eines Drehmomentschlüssels gemäß der Schraubenherstellerangabe auf die Schrauben aufgebracht.

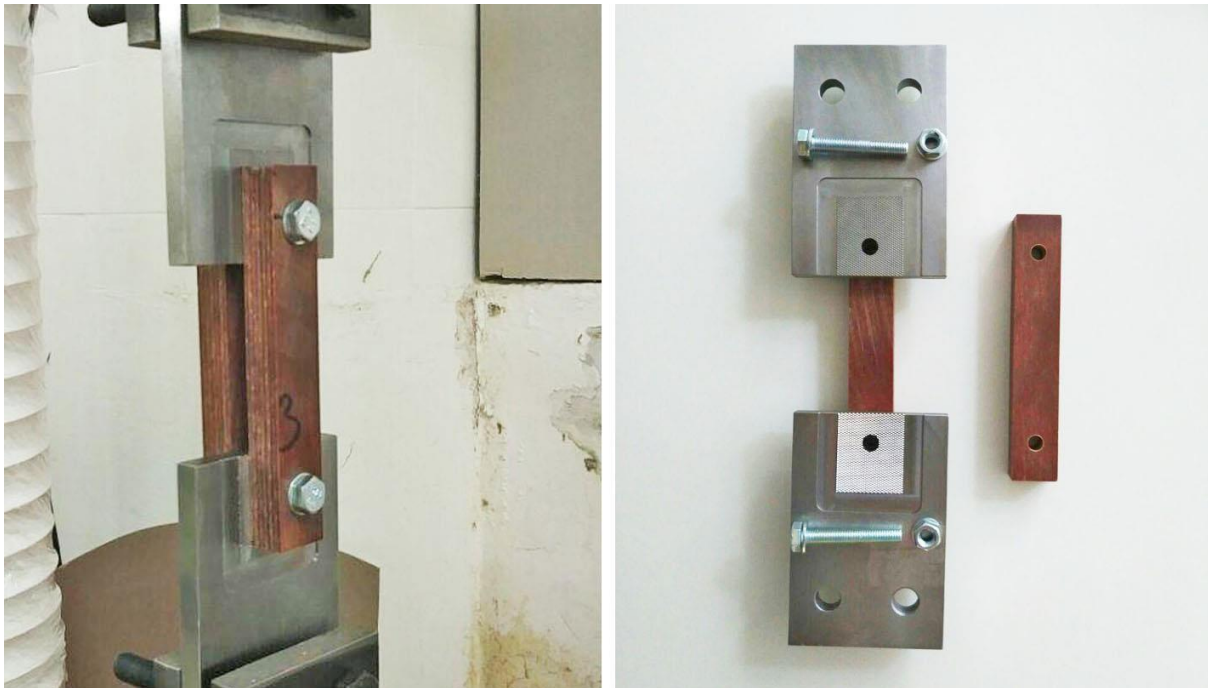


Abbildung 194: Zugversuch an Blechen mit gerändelter Oberfläche

Für die Schrauben M8 und M10 wurde die Tragfähigkeit unmittelbar nach dem Vorspannen der Schrauben ermittelt. Für die Schrauben M8 wurden zusätzlich Versuche 35 Tage und 105 Tage nach dem Aufbringen der Vorspannkraft durchgeführt. Alle Versuche wurden unter einem Randabstand von $a_3 = 2,5 \times d$ und $a_4 = 1,5 \times d$ sowie an 15 mm starken KP-Querschnitten der Qualität BE 335-1 67 % L / 33 % Q durchgeführt.

I) Vergleich des Tragverhaltens und der Tragfähigkeit gleitfester Verbindungen auf gerändeltem Stahlblech mit gleitfesten Verbindungen auf glattem Stahlblech und mit Verbindungen ohne vorgespannten Schrauben auf glattem Stahlblech.

Mit den gerändelten Stahlblechen und unter Verwendung vorgespannter Schrauben stieg die mittlere Tragfähigkeit der Prüfkörper mit Schraubenanschluss M8 um 75 % gegenüber den Prüfkörpern mit nichtvorgespannten Schrauben und ohne gerändelter Metalloberfläche an. Beim Schraubenanschluss M10 steigerte sich der Wert um 45 %.

Unter der Verwendung vorgespannter Schrauben führte das Rändeln der Stahlplatten zu einer deutlichen Steigerung der mittleren Tragfähigkeit gegenüber glatten Stahlblechen. Dabei fiel die Streuung der Festigkeitskennwerte bei der Verwendung gerändelter Stahlplatten deutlich geringer aus als bei der Verwendung glatter Stahlbleche (vgl. Abbildung 195, S. 209). Der charakteristische Kennwert der Tragfähigkeit der Stichprobe an Prüfkörpern mit vorgespannten Schrauben M8, 8.8 und gerändeltem Stahlblech verdoppelte sich nahezu gegenüber dem charakteristischen Kennwert der Tragfähigkeit der Stichprobe an Prüfkörpern ohne vorgespannten Schrauben und ohne Rändel. Um 2/3 vergrößerte sich der Wert gegenüber Prüfkörpern mit vorgespannten Schrauben aber ohne Flächenrändel. Vergleicht

man den charakteristischen Wert der Tragfähigkeit nach Johansen für den gleichen Anschluss mit Fichtenholz C24 (ohne Vorspannung), fällt die charakteristische Tragfähigkeit unter der Verwendung von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q mit vorgespannten Schrauben auf gerändelter Oberfläche fast 5-fach höher aus.

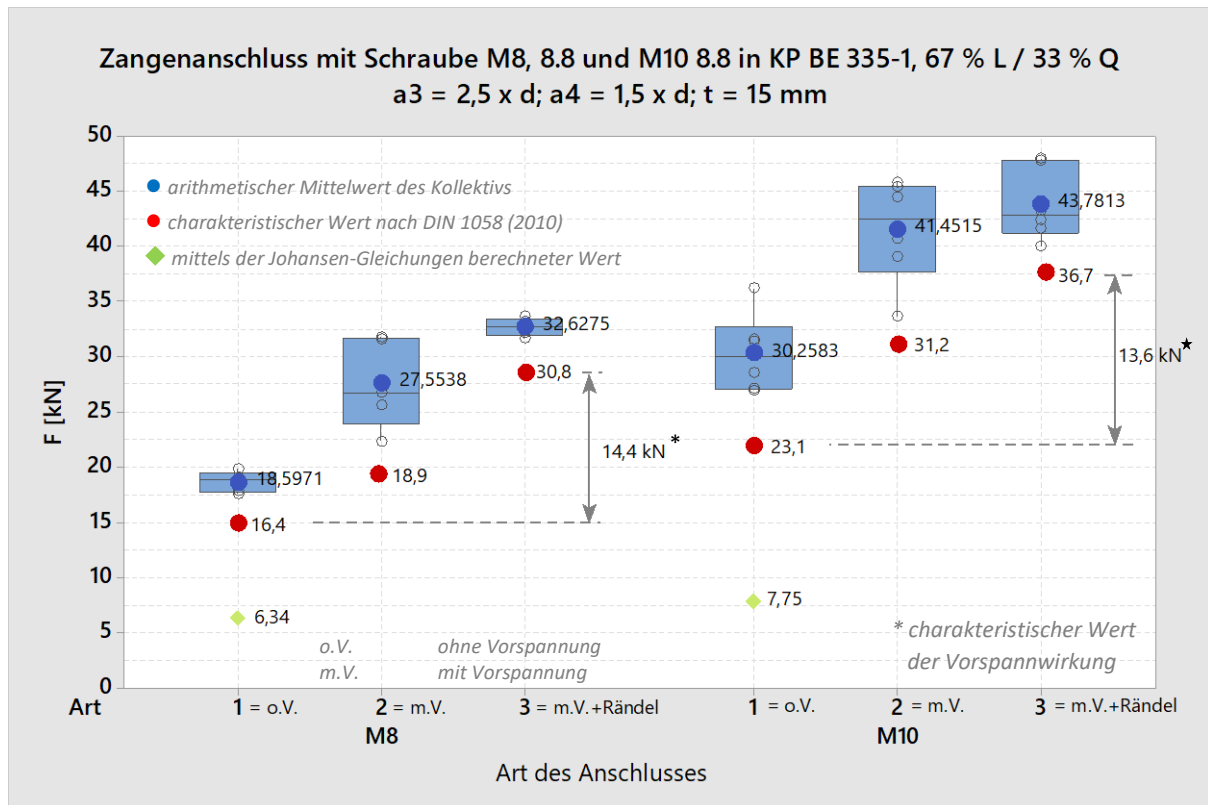


Abbildung 195: Einfluss der Vorspannung auf die Tragfähigkeit von Zangenanschlüssen

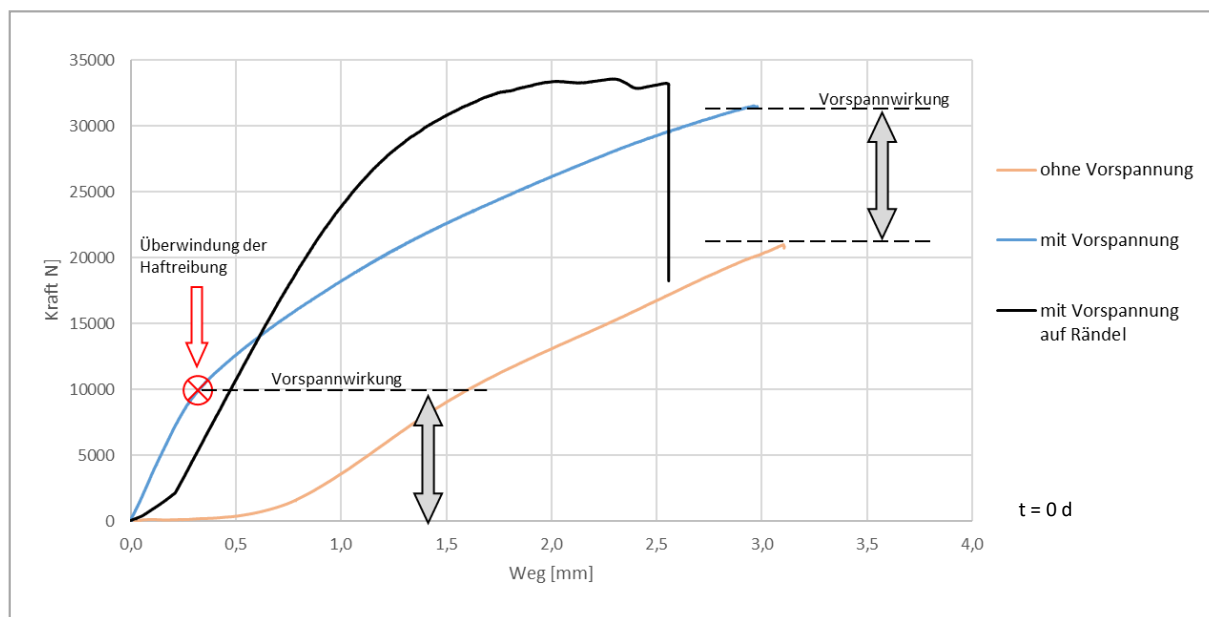


Abbildung 196: Vergleich Lochleibungsanschluss (orange) mit gleitfester Verbindung auf glattem Stahlblech (blau) und gleitfester Verbindung auf gerändeltem Stahlblech (schwarz)

Während bei vorgespannten Schrauben auf glattem Stahlblech (s. Abbildung 196, S. 209, blaue Kurve) bei ca. 10 kN die Haftreibung überwunden und danach die Lochleibung beansprucht wird, zeigt sich an vorgespannten Schrauben auf gerändeltem Stahlblech (s. Abbildung 196, schwarze Kurve) zunächst kein Verlust der Haftreibung. Die Steigung der Kurve ist bis ca. 20 kN linear und mit der Steigung der Kurve für Prüfkörper mit vorgespannten Schrauben auf glattem Stahlblech vergleichbar. Ab ca. 20 kN nehmen die Verformungen kontinuierlich zu, bis bei ca. 33 kN ein Gleiten ohne Zunahme der Kraftgröße eintritt. Im Gegensatz zu den beiden anderen Kraft-Weg-Kurven tritt der Bruch nicht spontan ein, sondern kündigt sich durch einen ausgeprägten *Gleitbereich* an. Der Anschluss wird dadurch duktil, auch ohne dass die Bolzen Fließgelenke ausbilden. Durch vorgespannte Schrauben in Kombination mit gerändelten Kontaktflächen der Anschlusskonstruktion sind duktile, reversible Verbindungen möglich. Außerdem entfällt das stufige Gleiten bei glatter Oberfläche, wie in Abbildung 193, S. 206, was einer hohen Sicherheit gegenüber einem dynamischen Gleitreibungsversagen entspricht.

Größe der Rändelfläche

Nach VDI 2230 (2015, S.46 ff.) breitet sich die Druckkraft in vorgespannten Verbindungen als Druckkegel unterhalb der Unterlegscheibe aus. Der Kegelwinkel wird unter anderem durch die räumliche Ausbreitung der zu verbindenden Querschnitte und durch das Verhältnis der Klemmlänge (l_k) zum Außendurchmesser der ebenen Kopfauflagefläche der Schraube (d_w) beeinflusst. Entspricht die Klemmlänge ca. dem 5-fachen des Außendurchmessers der ebenen Kopfauflagefläche, breitet sich der Druckkegel unter einem Winkel von ca. 35° - bei ausreichend großer flächiger Ausdehnung der zu verbindenden Fügeteilpartner - aus; bei kleineren Verhältnissen $\beta_L = l_k/d_w$ fallen die Winkel etwas geringer aus (VDI 2230, 2015, S. 46). Mit dieser geometrischen Beziehung lässt sich die Flächenabmessung des Rändels in Abhängigkeit der mittels der Schraube zu verbindenden Querschnitte und des Durchmessers von Schraube und Unterlegscheibe herleiten.

II) Vergleich des Tragverhaltens und der Tragfähigkeit gleitfester Verbindungen auf gerändeltem Stahlblech nach unmittelbarer Aufbringung der Vorspannkraft ($t = 0$ d = t_0) und nach 35-tägiger ($t = 35$ d) und 105-tägiger ($t = 105$ d) Vorspannung der Stahlschrauben.

Die nach 35-tägiger Vorspannung und nach 105-tägiger Vorspannung ermittelten Tragfähigkeiten waren im Wesentlichen mit den Tragfähigkeiten, die unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannung ermittelt wurden, vergleichbar. Zwar liegen sowohl der Mittelwert als auch der charakteristische Kennwert der Stichprobe nach 105-tägiger Vorspannung geringfügig unter den unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannung ermittelten Kennwerten (vgl. Abbildung 197, S. 211), jedoch sind mit 4 % für den Mittelwert und 7 % für den charakteristischen Kennwert die Unterschiede zu gering, um eine eindeutige Tendenz ableiten zu können. Hier müssten ggf. die Anzahl der Prüfkörper in den jeweiligen Versuchskollektiven gesteigert werden.

In den Kraft-Weg-Kurven (vgl. Abbildung 198, S. 211) zeigte sich nach 35-tägiger Vorspanndauer ein Verlust der Haftreibung bei ca. 16 kN. Der Verlust rührt daher, dass die Rändelspitzen durch die Oberfläche des KPs gezogen werden. (vgl. Abbildung 199, S. 212). Die Steigung der Kraft-Weg-Kurve nimmt ab und nähert sich der Steigung der Kraft-Weg-Kurve der Prüfkörper ohne Vorspannung der Schrauben an. Nach 105-tägiger Vorspannung tritt der Verlust der Haftreibung bei ca. 10 - 12 kN ein. Im Anschluss daran nähert sich auch hier die Steigung der Kraft-Weg-Kurve der Steigung der Kraft-Weg-Kurve der

Prüfkörper ohne Vorspannung der Schrauben an. Im Gegensatz zu vorgespannten Schrauben auf glatten Stahlblechen (vgl. Abbildung 193, S. 206), kam es nach der Überwindung der Haftreibung zu keinem vollständigem Verlust der Gleitreibung.

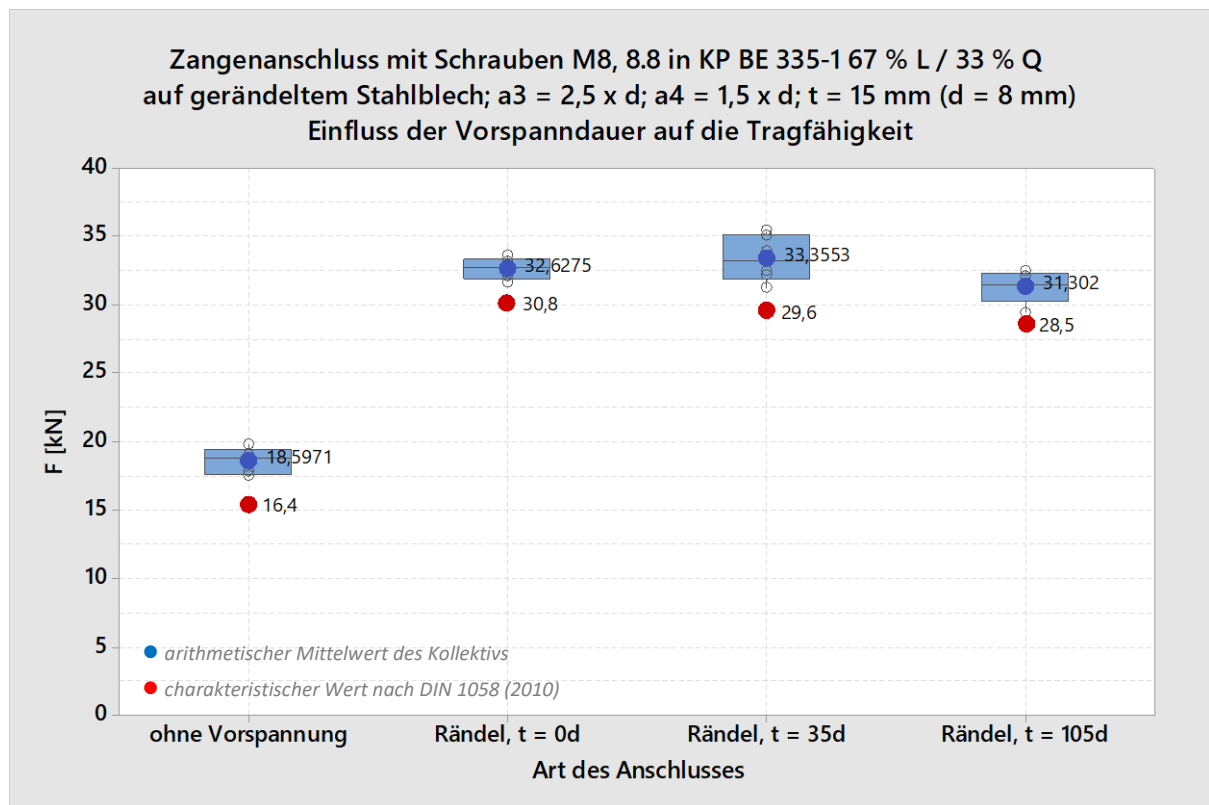


Abbildung 197: Zug-Zangenanschluss mit Schrauben M8, 8.8 in KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q auf gerändeltem Stahlblech

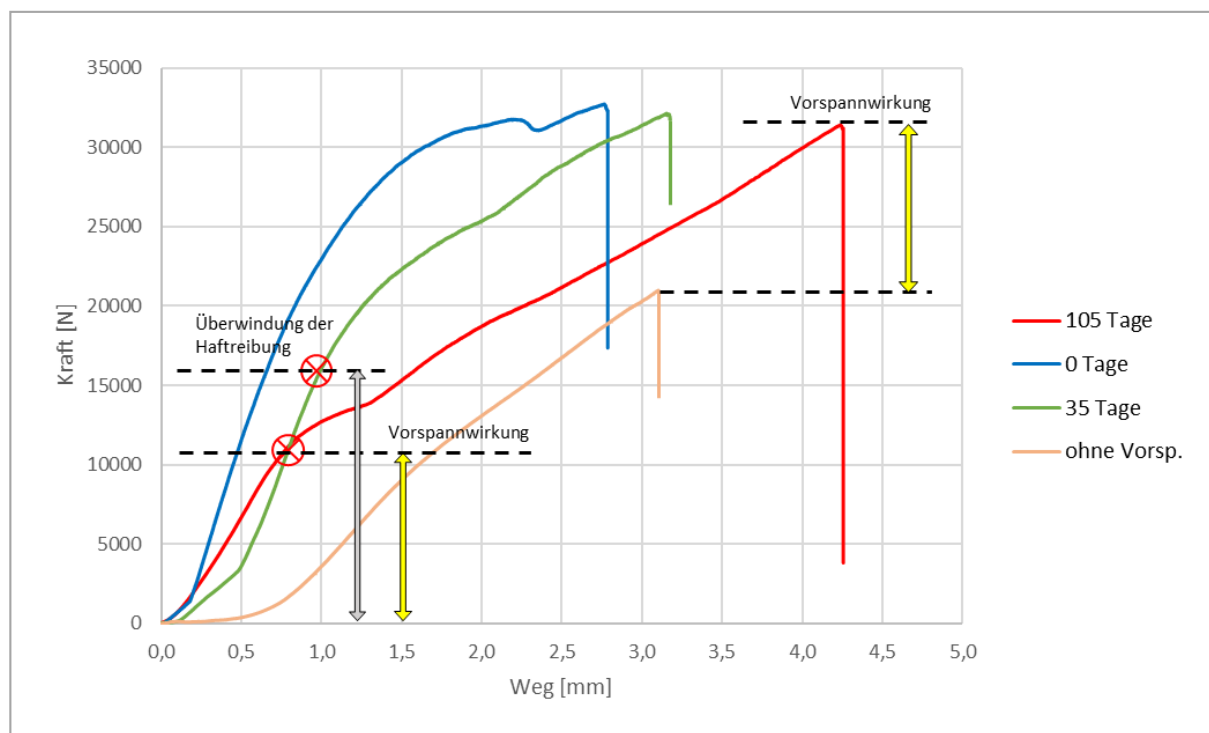


Abbildung 198: Vergleich Lochleibungsanschluss (orange) mit gleitfester Verbindung auf gerändeltem Stahlblech nach $t = 0d$ (blau), $t = 35d$ (grün) und $t = 105d$ (rot)

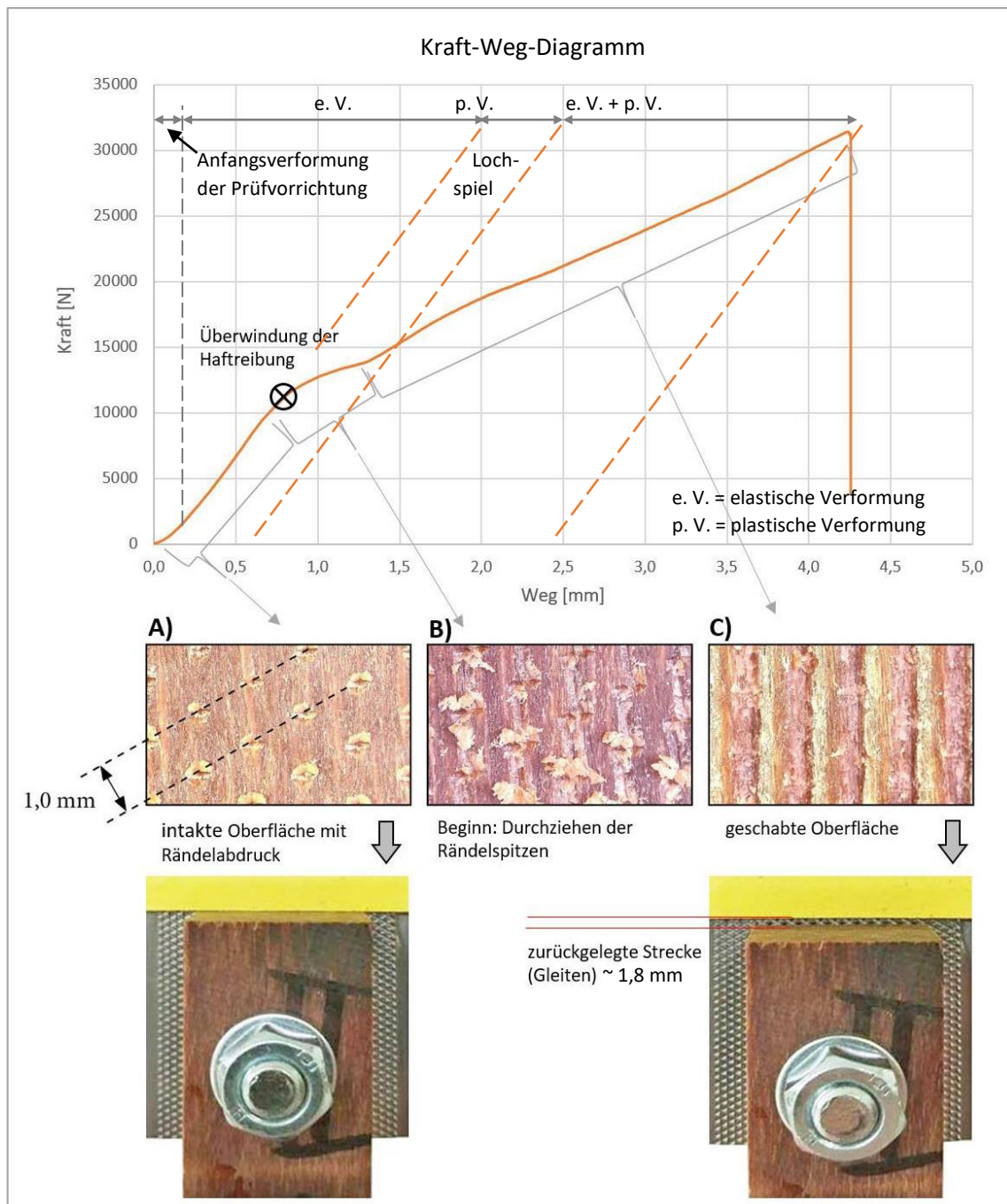


Abbildung 199: Verlust der Haftreibung. Durchziehen der Rändelspitzen durch die KP-Oberfläche

In Abbildung 199 verdeutlichen die Mikroskopaufnahmen A), B), C) den Zustand der KP-Oberfläche in Abhängigkeit der Lastgröße. Bis ca. 12 kN ist die Oberfläche intakt (A); es zeigt sich lediglich der Abdruck der Rändelspitzen, die sich ca. 0,1 bis 0,15 mm tief in die Oberfläche drücken. Bis zu diesem Lastniveau sind die Verformungen rein elastisch. Ab 12 kN tritt das Gleiten des Rändels ein, was sich in Form von einer abnehmenden Kurvensteigung bemerkbar macht. In Aufnahme (B) ist der Beginn der Oberflächenschädigung dargestellt, bei der die Rändelspitze durch die Oberfläche des KPs gezogen und ein spanförmiger Materialabtrag beginnt, der mit steigender Belastung zu einer vollständigen Kannelierung der Oberfläche führt (C). Das Gleiten verläuft zunächst bis zu dem Moment an dem der Schraubenmantel an der Lochleibung des Rändelbleches anliegt. Danach tritt eine Kombination aus Lochleibungsbeanspruchung und Rändelgleitbeanspruchung auf. Die lokalen Abdrücke der Rändelspitzen in

Mikroskopaufnahme A) verdeutlichen, dass nur ein kleiner Teil der Oberfläche durch das Flächenrändel aktiviert wird. Eine bessere Lasteinleitung könnte mit Mikrorändeln erreicht werden, also mit Rändeln mit besonders kleiner Teilung t.

6.2.2 Fazit gleitfester Anschluss

Mit gleitfesten Verbindungen lassen sich einerseits hochsteife Verbindungen ohne vorhandenes Lochspiel als auch hochfeste Verbindungen ausbilden. Die Steifigkeit der Bauteilanschlüsse lässt sich zugleich mit verhältnismäßig großen Bohrungstoleranzen erreichen. Dies ist insofern wichtig, da jedes Holzbauteil Schwind- und Quellbeanspruchungen ausgesetzt ist, was zwangsläufig zu einer Dimensionsänderung bei schwankender Temperatur und Luftfeuchte führt, insofern die Oberflächen nicht mit einem entsprechenden Oberflächenschutz versehen sind (vgl. 4.2.7, S. 123 ff.). Aus diesem Grund müssen bei jeder Konstruktion ausreichende Montagetoleranzen eingeplant werden, um einen einfachen Aufbau auf der Baustelle gewährleisten zu können. Nach dem Vorspannen der Schrauben wird ein Kraftschluss zwischen den Scherflächen erreicht.

Das Vorspannen der Verbindungsmittel führt zu einer deutlichen Leistungssteigerung der Tragfähigkeit im Anschlussbereich gegenüber nichtvorgespannten Verbindungsmitteln gleichen Durchmessers. Durch das Vorspannen der Gewindeschrauben wird die Scherfuge zunächst auf Haftreibung aktiviert. Nach dem Eintreten des Gleitens wird ab dem Zeitpunkt, an dem die Mantelfläche oder der Gewindegang an der Lochleibung anliegt, neben der Flächenreibungskraft in der Scherfuge, zusätzlich eine Lochleibungskraft aktiviert. Auf glattem Stahlblech vergrößert sich die Tragfähigkeit um das Maß der Haftreibungskraft (vgl. Abbildung 193, S. 206). Im Langzeitversuch zeigte sich auf glattem Stahlblech kein Abfall des Mittelwertes der Tragfähigkeit der Versuchsreihe gegenüber der Versuchsreihe, die unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft durchgeführt wurde. Es zeigten sich jedoch deutliche Unterschiede in den Kraft-Weg-Diagrammen der drei Versuchsreihen. Während die Kraft-Weg-Diagramme der Versuchsreihe, die unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft durchgeführt wurde, ab dem Zeitpunkt des Gleitens einen weiteren kontinuierlichen Anstieg mit geringerer Steigung zeigten, traten in den Versuchsreihen nach 35-tägiger und nach 105-tägiger Vorspannung ab dem Eintreten des Gleitens plötzliche Kraftabfälle auf, die auf einen kurzzeitigen vollständigen Verlust von Haft- und Gleitreibung zurückzuführen sind.

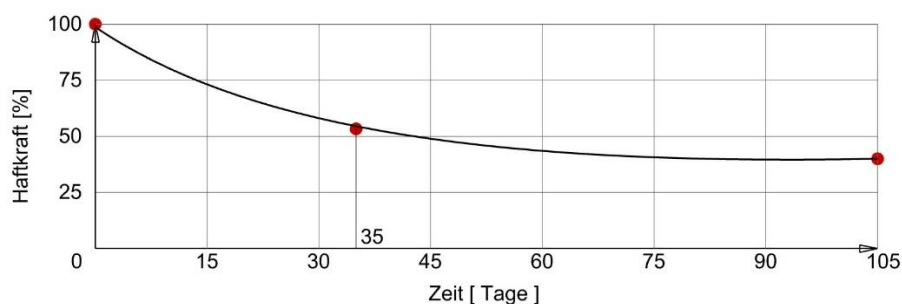


Abbildung 200: Zeitliche Entwicklung der Haftkraft

Eine Vergrößerung des Reibungskoeffizienten zwischen Stahl und KP führt zu einer weiteren Steigerung der Tragfähigkeit. Hier konnten hohe Tragfähigkeiten durch das Rändeln der Oberfläche des Verbindungsbleches erzielt werden. Zwar zeigte sich in den Langzeitversuchen, dass es nach 35-tägiger

und nach 105-tägiger Vorspanndauer zu einem Verlust der Haftreibung in der Scherfuge kommt, jedoch deutet die zeitliche Entwicklung darauf hin, dass der Verlust der Haftreibung nach 105 Tagen abgeschlossen ist. In (vgl. Abbildung 200, S. 213) sind dazu die aus dem Datenmaterial abgeleiteten Haftkräfte bei $t = 35 \text{ d}$ und bei $t = 105 \text{ d}$ mit der Haftkraft bei $t = 0 \text{ d}$ ins Verhältnis gesetzt.

Im Gegensatz zu Verbindungen mit glatten Stahlblechen zeigten sich an Verbindungen mit gerändelten Stahlblechen nach Überwindung der Haftreibung keine Lastabfälle. Die ermittelten Bruchlasten lagen nach 35-tägiger Vorspannung und nach 105-tägiger Vorspannung in etwa gleichauf mit den Bruchlasten, die unmittelbar nach dem Aufbringen der Schraubenvorspannung ermittelt werden konnten.

Anhand der durchgeführten Versuche ist zum gegenwärtigen Stand davon auszugehen, dass der Zuwachs der Tragfähigkeit, die durch den Einsatz vorgespannter Schrauben erzielt werden konnte, von Dauer ist. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass mit einer optimierten Rändelgeometrie die Tragfähigkeit von Anschlüssen unter Verwendung vorgespannter Schrauben gesteigert werden kann.

Weiterhin könnte die Verwendung von *Spannscheiben* in Kombination mit vorgespannten Schrauben dazu beitragen, dass nach Langzeitbeanspruchungen - und im Vergleich zu vorgespannten Schrauben ohne Spannscheiben - ein höherer Haftreibungskoeffizient erhalten bleibt. Dadurch würde das Gleiten der Verbindung auf einem höheren Kraftniveau einsetzen. Dies ist im Hinblick auf die Ausbildung reversibler Bauteilanschlüsse wichtig, denn eine erneute Verwendung der Elemente in Tragstrukturen mit vorgespannten Bauteilanschlüssen ist nur bei einer intakten KP-Oberfläche ohne Rändelriefen möglich.

Insofern der Verlust der Gleitreibung durch eine Abnahme der Schraubenvorspannung infolge von Kriecheffekten im Bereich der Kontaktfläche zwischen KP und Unterlegscheibe ausgelöst wird, wäre als mögliche Maßnahme eine Reduktion der Oberflächenpressung durch den Einsatz von Scheiben mit größerem Durchmesser (Abbildung 187, S. 200) - so z. B. Unterlegscheiben für den Holzbau nach DIN 1052 mit einem Durchmesser $\geq 3 \text{ d}$ und einer Stärke von $\min 0,3 \text{ d}$ - möglich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

6.2.3 Bemessungsvorschlag

In Kap. 6.2.1, S. 201 ff. wurde der Effekt des Einsatzes vorgespannter Schrauben auf die Tragfähigkeit von Zangenanschlüssen mit Seitenhölzern aus KP und einem Mittelblech mit gerändelter Oberfläche durch Prüfungen unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft quantifiziert. Für Schrauben M8, 8.8 lag der Vorspanneffekt bei $7,3 \text{ kN / Schraube}$ und Scherfläche, für Schrauben M10, 8.8 bei $6,8 \text{ kN / Schraube}$ und Scherfläche. Die Vorspanneffekte wurden jeweils unter Verwendung von Standard-scheiben erzielt. Es wird angenommen, dass der Vorspanneffekt unabhängig von der Stärke der Seitenhölzer und damit unabhängig von der Schraubenklemmlänge ist, insofern die Rändelfläche jeweils gleich groß ist.

Für die Berechnung der Tragfähigkeit von Bauteilanschlüssen von KP-Querschnitten auf Stahlbleche sollen die Johansen-Gleichungen herangezogen werden. Anstatt des charakteristischen Wertes des Ausziehwidestands des Verbindungsmittels $F_{ax,Rk}$ wird der Vorspanneffekt $F_{VS,Rk}$ in den Gleichungen angesetzt:

Für Stahlbleche jeder Dicke als Mittelteil:

$$F_{v,Rk} = F_{VS,Rk} + \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \\ f_{h,1,k}^* \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k}^* \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] \\ 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k}^* \times d} \end{array} \right\}$$

Für dünne Stahlbleche als Seitenteile:

$$F_{v,Rk} = F_{VS,Rk} + \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \times f_{h,2,k}^* \times d \times t_2 \\ 1,15 \times \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h,2,k}^* \times d} \end{array} \right\}$$

Für dicke Stahlbleche als Seitenteile:

$$F_{v,Rk} = F_{VS,Rk} + \min \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \times f_{h,2,k}^* \times d \times t_2 \\ 2,3 \times \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h,2,k}^* \times d} \end{array} \right\}$$

$F_{v,Rk}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel

$f_{h,1,k}^*$ charakteristischer Wert der bezogenen Lochleibungsfestigkeit der Seitenhölzer

$f_{h,2,k}^*$ charakteristischer Wert der bezogenen Lochleibungsfestigkeit des Mittelholzes

d Durchmesser des Verbindungsmittels

➤ für M8, 8.8 ist $d = 7,19$ mm, für M10, 8.8 ist $d = 9,03$ mm

t_1 Stärke der Seitenhölzer

t_2 Stärke des Mittelholzes

$M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmoments des Verbindungsmittels

➤ mit $M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6}$

➤ für M8, 8.8 ist $M_{y,Rk} = 40.523$ Nmm, für M10, 8.8 ist $M_{y,Rk} = 73.282$ Nmm

$f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit

$F_{VS,Rk}$ charakteristischer Wert der Vorspannwirkung pro Scherfuge

➤ für M8, 8.8 ist $F_{VS,Rk} = 7,2$ kN, für M10, 8.8 ist $F_{VS,Rk} = 6,8$ kN (s. Abbildung 195, S. 209)

Anmerkung nach DIN 1995-1 handelt es sich um ein dickes Stahlblech, wenn die Blechstärke mindestens der Stärke des Verbindungsmittels entspricht und der Lochdurchmesser maximal bei $1,1 \times d$ liegt. (DIN EN 1995-1-1, 2010, S. 65)

Insofern von einem starren Verbund ausgegangen werden soll, gilt:

$$F_{v,Rk} = F_{VS,Rk}$$

Die Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses berechnet sich dann mit:

$$F_{Rd} = \sum F_{v,Rk} \times \frac{\gamma_M}{k_{mod}}$$

F_{Rd} Bemessungswert der Tragfähigkeit des Bauteilanschlusses

γ_M Teilsicherheitsbeiwert für eine Baustoffeigenschaft, unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten und von geometrischen Abweichungen

k_{mod} Modifikationsbeiwert für Lasteinwirkungsdauer und Feuchtegehalt

6.3 Zerlegbare Freiformanschlüsse mit KP-Ringknoten

In den vorherigen Kapiteln wurde die Möglichkeit der Verstärkung von Stabenden nativer Holzstäbe, mit dem Ziel der Steigerung der Tragfähigkeit des Anschlussbereiches auf die Tragfähigkeit des ungeschwächten Stabbruttoquerschnitts, untersucht. Für unterschiedliche Stabquerschnitte wurden statisch optimierte Stablängen ermittelt und einzelne Stabgrundmodule definiert.

Das Entwerfen mit Grundmodulen - wie beispielsweise mit Ziegelsteinen – führt zu einer Kostenreduktion gegenüber dem Entwerfen mit individuell angefertigten Einzelementen, aufgrund einer seriellen Herstellung der Grundmodule. Modulare Systeme ermöglichen, je nach Größe der Grundmodule, eine mehr oder weniger genaue Annäherung an die Zielvorstellung von Planerinnen und Planern. Ist die exakte Einhaltung der Zielvorstellung erforderlich, müssen ggf. die Grundmodule modifiziert werden (z. B. Zuschnitt von Fliesen).

Die Länge der entwickelten Stabgrundmodule von 187,5 cm; 250 cm und 375 cm schränkt die Annäherung an die Planungszielvorstellung in ihrer Genauigkeit ein. Eine Modifikation des Grundmoduls, durch den Zuschnitt des Stabes, ist nicht möglich, da dadurch das verstärkte Stabende abgetrennt werden würde und die Verstärkung damit hinfällig wäre. Mit den Stabgrundmodulen lassen sich zudem ausschließlich lineare Tragstrukturen wie beispielsweise Fachwerkträger aber auch Fachwerkrahmen realisieren, was die Gestaltungsfreiheit begrenzt.

In diesem Kapitel wird das individuelle Entwerfen mit verstärkten Knoten thematisiert. Im Vordergrund steht hier nicht die statische Optimierung des Einzelstabes, sondern eine größtmögliche Gestaltungsfreiheit bei der Anordnung der Einzelstäbe zueinander und eine einfache Montage wie auch eine zerstörungsfreie Demontage aller Systemelemente. Der Knoten bildet sich nicht zwischen den verstärkten Einzelstäben in einer Metallplatte – so wie es am zuvor entwickelten Einzelstab mit verstärkten Stabende der Fall ist – aus, sondern wird als eigenständiges und individuelles Einzelement aus Kunstharzpressholz gefertigt, an das die nativen Stäbe mit der Stirnholzfläche stoßen.

6.3.1 Grundsätze der Knotengestaltung

Die Grundsätze für die nachfolgend vorgestellte Knotengestaltung liegen in der natürlichen Formgestalt von Astgabeln (Zwieseln):

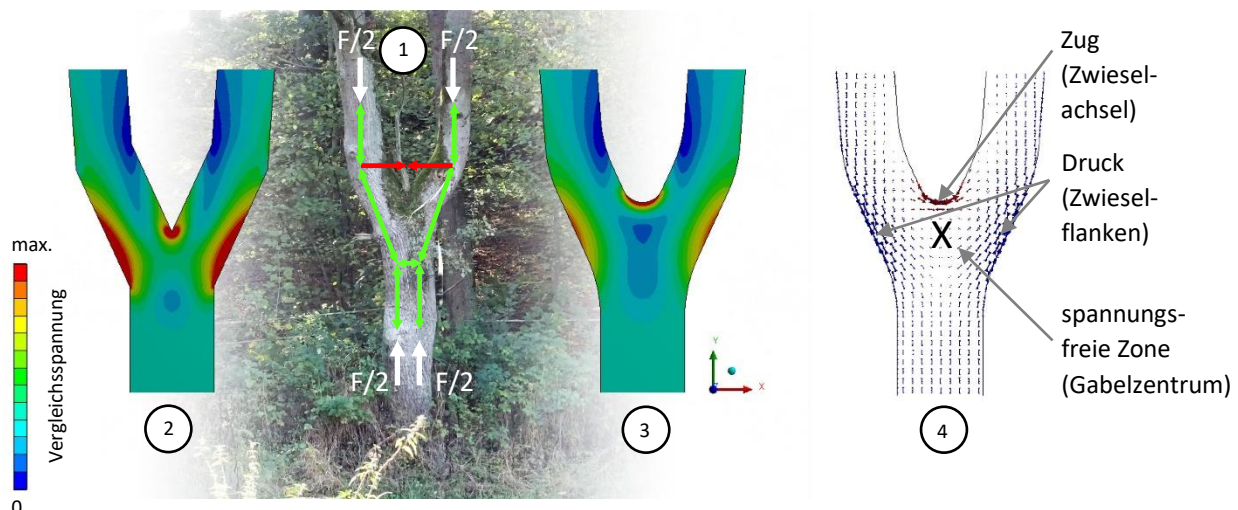


Abbildung 201: Spannungsanalyse in einer Baumgabelung

Abbildung 201, (1), S. 216 zeigt die Astgabelung einer Stieleiche und den Kraftfluss vereinfacht als ein Stabwerkmodell. Für die Astgabelung wurden zwei FE-Modelle (Abbildung 201, (2) und (3)) entwickelt, die die Spannungsverteilung, unter in Gravitationsrichtung orientierten Lasten, im Zwieselbereich als Vergleichsspannung wiedergeben. Das FE-Modell mit scharfen Geometriestößen (2) zeigt unter gleichen Lagerungs- und Lastbedingungen stärkere Spannungskonzentrationen mit höheren Spannungsspitzen (rot eingefärbte Bereiche) als das FE-Modell mit abgerundeten Geometriestößen (3). Die Formgebung des Knotenbereiches hat maßgebenden Einfluss auf die Spannungsspitzen und damit auf die Tragfähigkeit. Knotenpunkte mit abgerundeten Stabanschlüssen werden im Folgenden als *organische Knoten* beschrieben.

In Abbildung 201, (4) sind die Hauptspannungsvektoren (grün = Druck; rot = Zug) abgebildet, anhand derer zu erkennen ist, dass sich an den Zwieselflanken Druckspannungen und in der Zwieselachsel Zugspannungen konzentrieren. Im Gabelzentrum bildet sich eine weitgehend spannungsfreie Zone aus.

6.3.2 Konstruktionsprinzipien

6.3.2.1 Druck-Druck-Druck-Knoten, Orientierung der Stabachsen

Reine Druck-Druck-Druck-Knoten bilden sich nur dann aus, wenn die Winkel der einzelnen Stabachsen zueinander zwischen 90° und 180° betragen, vgl. Abbildung 202.

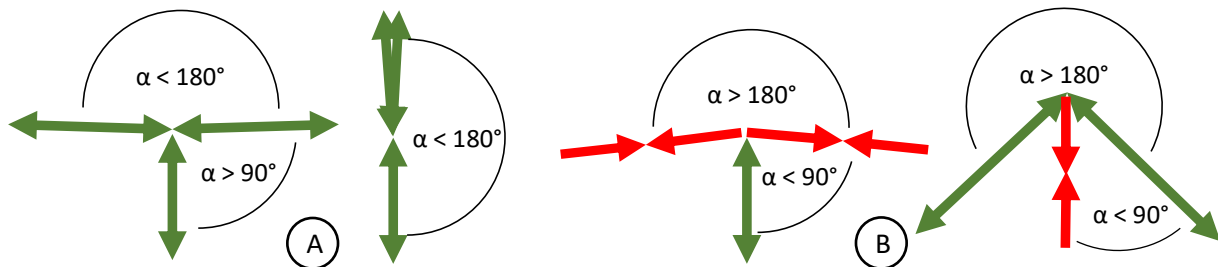


Abbildung 202: Geometrische Grenzen eines Druck-Druck-Druck-, eines Zug-Zug-Druck- und eines Zug-Druck-Druck-Anschlusses

6.3.2.2 Zug-Zug-Druck-Knoten / Zug-Druck-Druck-Knoten, Orientierung der Stabachsen

Liegen die Winkel der Stabachsen sowohl unter 90° als auch über 180° zueinander, dann bilden sich entweder Anschlüsse aus zwei Zugstäben und einem Druckstab oder Anschlüsse aus einem Zugstab und zwei Druckstäben aus (Abbildung 202).

6.3.2.3 Materialanforderung

Die Ausbildung organischer Knotenformen am Einzelstab aus nativen Holz macht aus zweierlei Gesichtspunkten keinen Sinn:

1. Ein Holzstab weist einen über die Stablänge gleichmäßige Querschnittsausdehnung auf, so dass die Ausbildung organischer Knotenformen mit geometrischen Aufweitungen an den Stabenden nur durch eine Materialabtragung (Fräsen) zwischen den Anschlussbereichen erfolgen kann (vgl. Kap. 2.3.2, Abbildung 13, S. 16). Es ist daher erforderlich Knoten und Stab in zwei Einzelelemente zu differenzieren.
2. Durch die Anisotropie des Holzes sind die Materialeigenschaften von der Belastungsrichtung abhängig. Ein Druckanschluss quer zur Stabachse ist – bei gleicher Anschlussfläche – aufgrund der deutlich geringeren Querdruckfestigkeit weniger leistungsfähig als ein Druckanschluss parallel zur Stabachse.

Soll am Knoten der Anschluss von Stäben unter unterschiedlichen Winkeln ermöglicht werden, muss das Material für den Ringknoten möglichst isotrop aufgebaut werden. Dies kann durch die Ausbildung eines Sternholzes (vgl. Kap. 3.2, Abbildung 31, S. 36) erfolgen, bei dem die einzelnen Furnierlagen um jeweils 15° bis 45° verdreht angeordnet werden.

Das in Abbildung 203 dargestellte Polardiagramm stellt die Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Faserorientierung für natives Holz (rote Kurve) und für Sperrholz (lilafarbene Kurve) dar. Bei nativem Holz liegt die Elastizität quer zur Faser bei etwa 10 %, bezogen auf die Elastizität in Faserlängsrichtung. Bei kreuzförmig aufgebautem Sperrholz ist die Elastizität in Richtung der beiden Hauptachsen gleich und beträgt etwa 55 % der Elastizität von nativem Holz in Longitudinalrichtung. Sie ist unter einem Winkel von 45° bezogen auf die beiden Hauptachsen am Geringsten und liegt etwa bei 25 % der Hauptachsenelastizität.

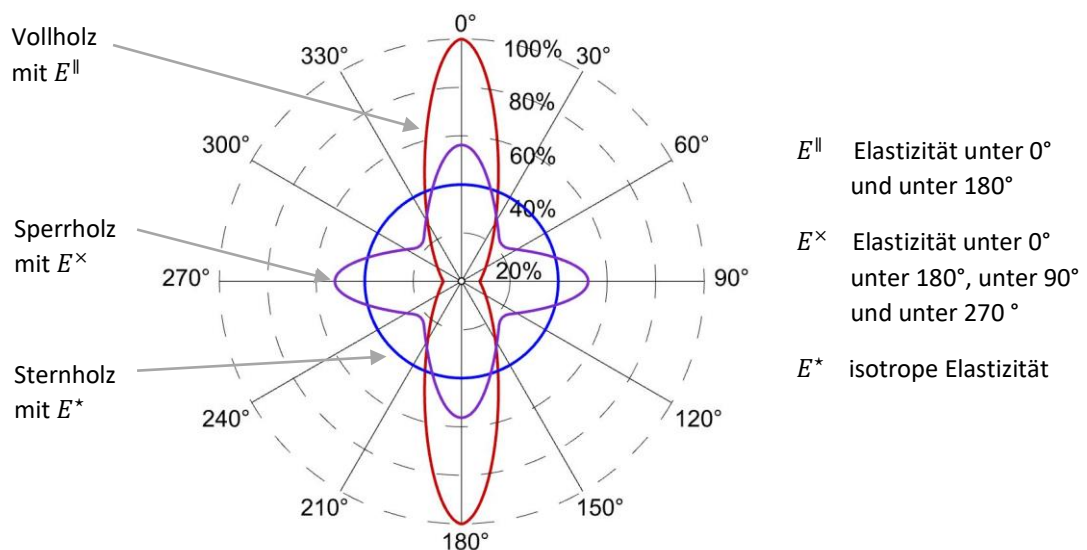


Abbildung 203: Anisotrope Elastizität (Polardiagramm) von Vollholz

„Durch Verringerung des Winkels zwischen den Lagen kann bei Sperrholz ein weitgehend kreisförmiges Polardiagramm erreicht werden (z. B. bei Sternholz).“ Niemz & Sonderegger, 2017, S. 277.

Da das Integral der Polarkurven konstant ist, lässt sich für ein kreisförmiges Polardiagramm eine isotrope Elastizität von ca. 40 % der anisotropen Hauptachsenelastizität ableiten (Abbildung 203, blauer Kreis).

Es gilt:

$$E_{max}^{\times} \sim 0,55 \times E_{max}^{\parallel}$$

$$E^* \sim 0,4 \times E_{max}^{\parallel}$$

$$\text{bzw. } E^* \sim 0,4 \times \frac{E_{max}^{\times}}{0,55}$$

Dies bedeutet, dass der Aufbau von Stab und Knoten nur dann aus ein und demselben Material erfolgen kann, wenn die Druckfestigkeit des Stabes maximal zu 40 % ausgeschöpft wird, was bei entsprechend langen Druckstäben der Fall sein kann. Bei kurzen Stäben muss die Festigkeit des Knotens gesteigert werden, was beispielsweise durch die Wahl festerer Hölzer oder durch mechanische Holzmodifikation erfolgen kann (KP). In erster Näherung lässt sich das Polardiagramm auf KP übertragen, jedoch ist zu beachten, dass die Abnahme des Elastizitätsmoduls von KP mit kreuzweiser Furnierorientierung gegenüber KP mit paralleler Orientierung mit $\sim 30\%$ etwas geringer ausfällt (Deho-1, 2019) als es bei nativem Holz (Abnahme von 45 %) der Fall ist. Es ist somit davon auszugehen, dass der Festigkeitsabfall sternförmiger KP-Aufbauten gegenüber parallel und gegenüber kreuzweise orientierter KP-Aufbauten geringer ausfällt als es bei nativen Sperrhölzern der Fall ist. Die Übertragung des Polarmodells auf KP und die dadurch ableitbaren Steifigkeiten und Festigkeiten sind daher als konservativ zu verstehen.

Unter Kenntnis des Druck-Elastizitätsmoduls kann die Druckfestigkeit für Buchenholz über nachfolgende Regressionsgleichung abgeleitet werden:

$$\ln(f_c) = 2,88 + 1,13 \times 10^{-4} \times E_c - 2,71 \times 10^{-9} \times E_c^2 \quad (\text{Frese, 2006, S. 13})$$

f_c Druckfestigkeit

E_c

Druck-Elastizitätsmodul

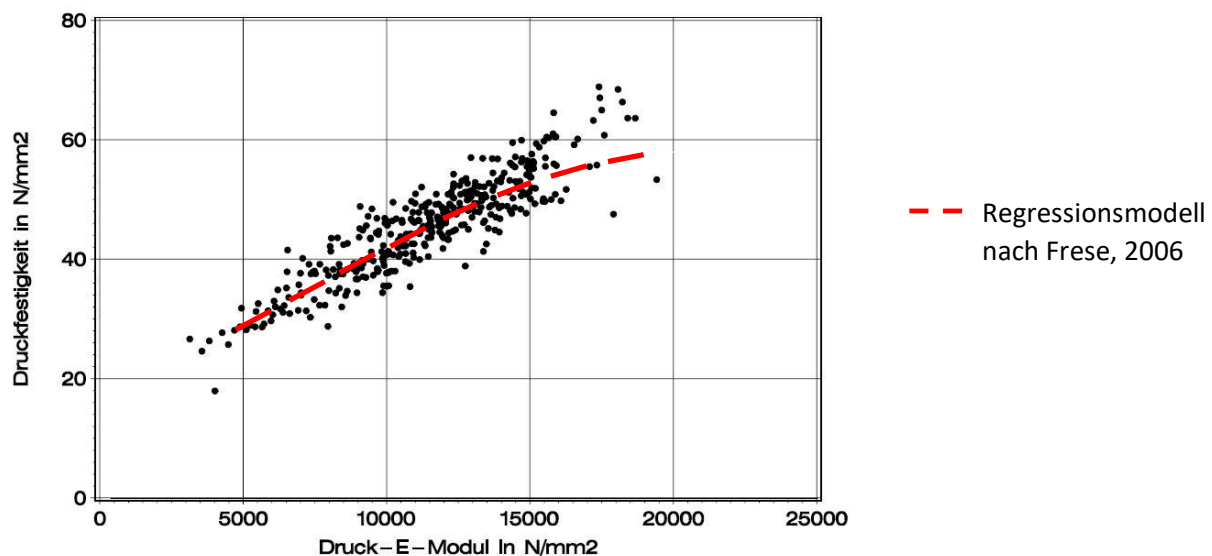


Abbildung 204: Buchenholz: Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Elastizitätsmodul

Unter der Annahme der Anwendbarkeit des Polarmodells auf Buchenholz als auch auf KP und unter der Annahme vergleichbarer Abhängigkeit zwischen Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul, lassen sich folgende isotrope Druckfestigkeiten für sternförmig aufgebaute Sperrhölzer aus Buche und aus KP abschätzen:

6.3.3 Festigkeit und Steifigkeit sternförmig aufgebauter Furniersperrholzwerkstoffe

6.3.3.1 BauBuche GL75

$$E_{mean}^{\parallel} = 16.800 \frac{N}{mm^2};$$

(Herstellerangabe)

$$E_{mean}^* = 0,4 \times E_{mean}^{\parallel} = 6.720 \frac{N}{mm^2}$$

(abgeleitet aus Polarmodell, S. 218)

Unter einem Druck-Elastizitätsmodul von $E_1 = 16.800 \text{ N/mm}^2$ liegt die Druckfestigkeit nativen Buchenholzes bei $f_{c,1}^{\parallel} = 55,3 \text{ N/mm}^2$; unter einem Druck-Elastizitätsmodul von $E_2 = 6.720 \text{ N/mm}^2$ bei $f_{c,2}^{\parallel} = 33,7 \text{ N/mm}^2$; und damit bei $60,8\% \times f_{c,1}^{\parallel}$ (Regressionsmodell S. 219). Mit der Übertragung dieses Größenverhältnisses auf Buchenfurnierschichtholz (GL75) mit $f_{c,k}^{\parallel} = 59,4 \text{ N/mm}^2$ (Herstellerangabe) liegt die Druckfestigkeit eines sternförmig aufgebauten Sperrholzes bei:

$$f_{c,k}^* = 60,8\% \times f_{c,k}^{\parallel} = 60,8\% \times 59,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \sim \mathbf{36,2 \frac{N}{\text{mm}^2}}$$

6.3.3.2 KP BE 335-1

$$E_{mean}^* = 16.804 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2};$$

(Kap. 3.2, Tabelle 5, S. 50)

$$E_{mean}^* = 0,4 \times \frac{E_{mean}^*}{0,55} \sim 12.221 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

(abgeleitet aus Polarmodell, S. 218)

Unter einem Druck-Elastizitätsmodul von $E_1 = 16.804 \text{ N/mm}^2$ liegt die Druckfestigkeit nativen Buchenholzes bei $f_{c,1} = 55,3 \text{ N/mm}^2$; unter einem Druck-Elastizitätsmodul von $E_2 = 12.221 \text{ N/mm}^2$ bei $f_{c,2} = 47,29 \text{ N/mm}^2$ und damit bei $85,5\% \times f_{c,1}$ (Regressionsmodell S. 219). Mit der Übertragung dieses Größenverhältnisses auf KP BE 335-1 mit $f_{c,k}^* = 189,5 \text{ N/mm}^2$ (Kap. 3.2, Tabelle 5, S. 50) liegt die Druckfestigkeit eines sternförmig aufgebauten Sperrholzes bei:

$$f_{c,k}^* = 85,5\% \times f_{c,k}^* = 85,5\% \times 189,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \sim \mathbf{162 \frac{N}{\text{mm}^2}}$$

$f_{c,k}^{\parallel}$	charakteristische Druckfestigkeit von faserparallel orientierten Furnieren und von nat. Holz in Faserrichtung
$f_{c,k}^*$	charakteristische Druckfestigkeit eines Kreuz-Sperrholzes in Hauptachsenrichtung
$f_{c,k}^*$	charakteristische Druckfestigkeit eines Stern-Sperrholzes
E_{mean}^{\parallel}	mittlerer Elastizitätsmodul von faserparallel orientierten Furnieren und von nativem Holz in Faserrichtung
E_{mean}^*	mittlerer Elastizitätsmodul eines Kreuz-Sperrholzes in Hauptachsenrichtung
E_{mean}^*	mittlerer Elastizitätsmodul eines Stern-Sperrholzes

6.3.4 Fügung der Bauteile

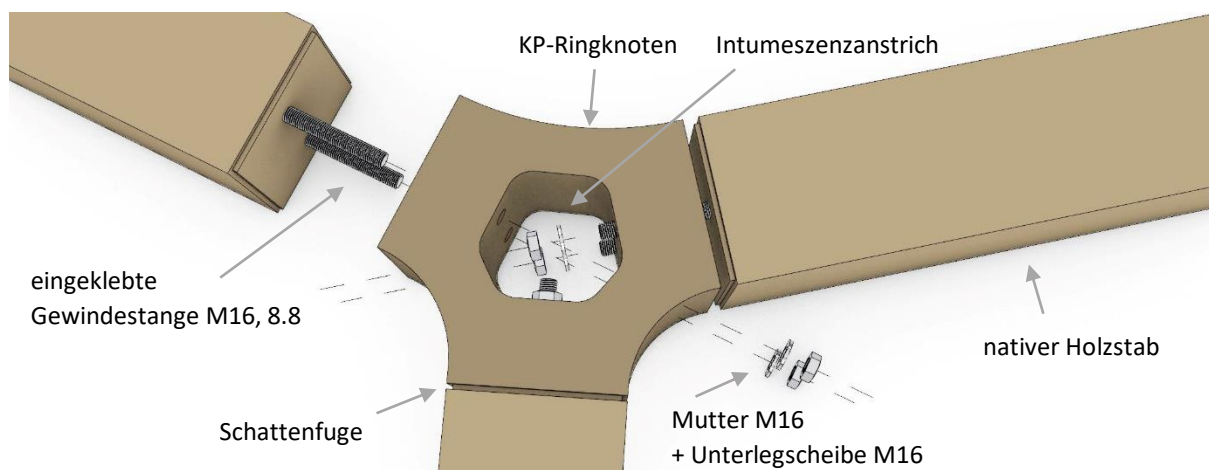


Abbildung 205: Konstruktionsprinzip von Freiformanschlüssen mit KP-Druck-Ringknoten

Abbildung 205, S. 220 stellt das Fügungs- und Aufbauprinzip von Freiformanschlüssen mit KP-Ringknoten dar. Im ersten Schritt werden in das Stirnholz der nativen Stäbe Gewindestangen mit Epoxidharz eingeklebt. Über diese werden die Stäbe dann am Ringknoten angeschlossen, indem sie zunächst über die im Knoten befindlichen Bohrungen positioniert und im Anschluss daran mittels Unterlegscheiben und Muttern fixiert werden. Unter einer Druckbeanspruchung werden die Kräfte über das Stirnholz des nativen Stabes direkt in den Knoten übertragen. Die Aufgabe der eingeklebten Gewindestäbe besteht unter einer Druckbelastung darin die Stäbe in ihrer Lage zu sichern und eine Einspannwirkung zu erzeugen. In Richtung der Rahmenebene kann sich ein Kräftepaar ausbilden. Dadurch kann das Knicken der auf der Rahmeninnenseite liegenden Druckstäbe aus der Ebene heraus verhindert werden. Dieses Stabilisierungsmoment wird in der Dach- und Wandebene kurzgeschlossen. Weil sich im KP-Knoten die Furniorientierung von der der anschließenden Stäbe unterscheidet wird eine umlaufende Schattenfuge zur klaren optischen Differenzierung von Stab und Knoten vorgesehen. Hinsichtlich des Brand-schutzes wird an den Innenflanken des KP-Ringes ein Intumeszenzanstrich aufgebracht, der im Brandfall aufschäumt, die Zentrumsöffnung des Knotens vollständig ausfüllt und die metallischen Verbindungsmittel vor thermischer Beanspruchung schützt.

6.3.5 Dreigelenkrahen mit KP-Ringknoten

Im Pilotprojekt *T-Lab Diemerstein – Campus für innovativen Holzbau im Pfälzer Wald* soll das Dachtragwerk aus insgesamt 10 Dreigelenkrahen (vgl. Abbildung 206) aufgebaut werden. Die Rahmen bestehen aus BauBuche GL75 und weisen eine Spannweite von 12,5 m auf. Die Lasteinflussbreite liegt bei $e = 2,5$ m. Die Firstgelenk-, Trauf- und Raumknoten werden als KP-Ringknoten ausgeführt. Die Anschlüsse der Zugstäbe in der Wand- und Deckenebene an die inneren Druckstäbe erfolgen jeweils über einen doppelten Fersenversatz.

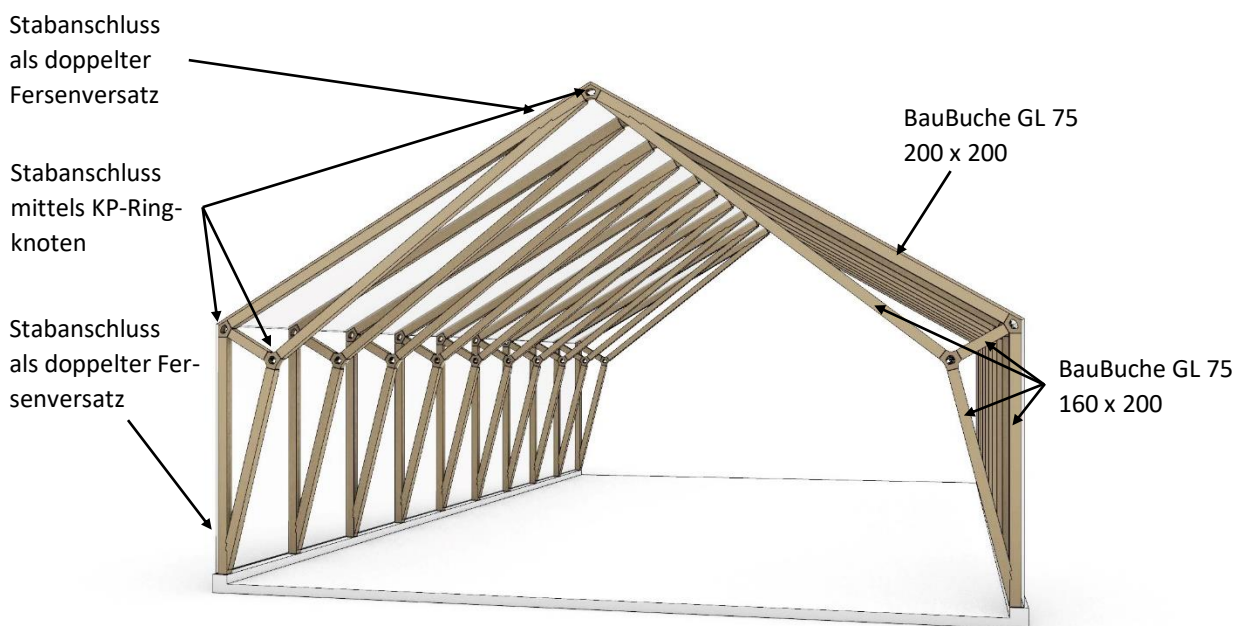


Abbildung 206: Visualisierung des Hallentragwerkes

Während der Entwurfsphase der Hallenkonstruktion wurde die Konstruktionslogik der Knoten in einem Computerskript beschrieben, um ein parametrisiertes Entwerfen mit der Möglichkeit einer automatisierten statischen Optimierung durch Formveränderung und anschließender FE-Analyse zu ermöglichen.

Für den Ringknoten wurde ein Grasshopperscript entwickelt, das die Veränderung folgender Parameter (s. dazu auch Abbildung 207) ermöglicht:

- Winkel zwischen den Stabachsen (1-2; 2-3; 3-1)
- Stabbreite der einzelnen Stäbe (1; 2; 3)
- Eckradien des Knoten (1-2; 2-3; 3-1)
- Knotenausdehnung (Kreis Knotenausdehnung)
- Zentrumsöffnung (Kreis; Parallelkurve 1; Parallelkurve 2; Parallelkurve 3; Radius Fräswerkzeug)

Während die Orientierung der Stabachsen durch die Form des Bauwerks bestimmt wird, kann die Proportion des Knotens (die Knotenausdehnung und die Zentrumsöffnung) individuell mit Hilfe des Grasshopperscriptes gestaltet werden.

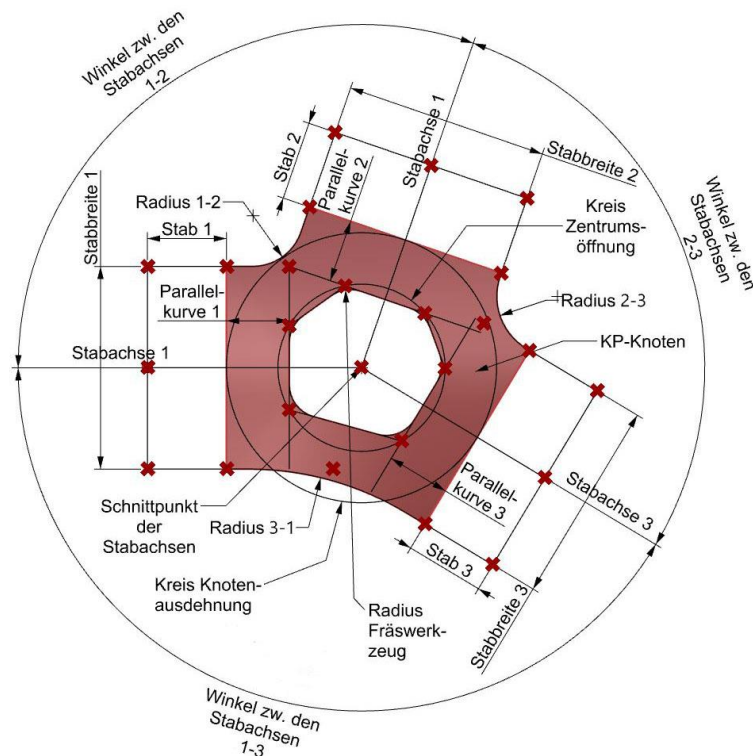


Abbildung 207: Konstruktionslogik und veränderbare Parameter

Mit Hilfe des Grasshopperscriptes wurden die unter Abbildung 208 dargestellten Knotenformen entwickelt:

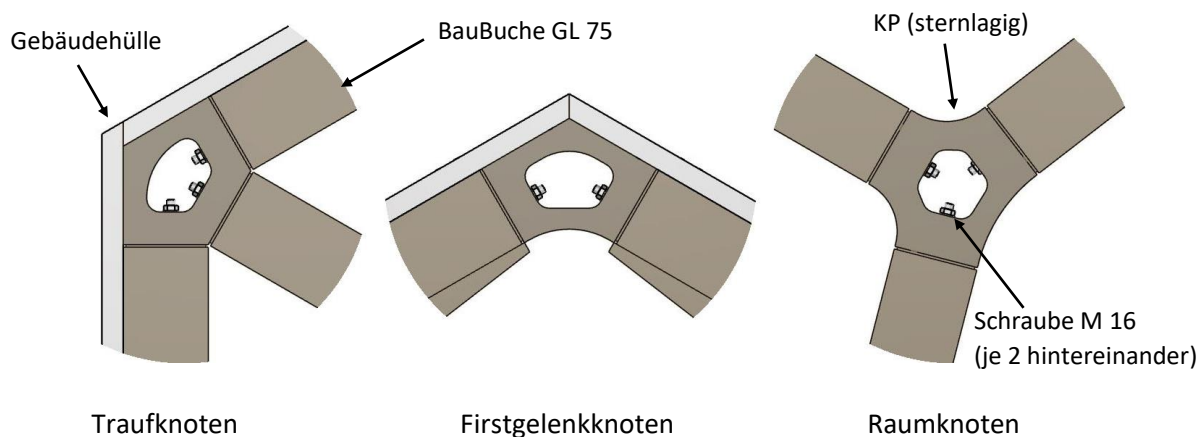


Abbildung 208: Knotendetail der Trauf-, Firstgelenk- und Raumknoten

6.3.5.1 Statisches System des Hallentragwerkes

Das Hallentragwerk kann mit nachfolgendem statischen System (vgl. Abbildung 209) beschrieben werden:

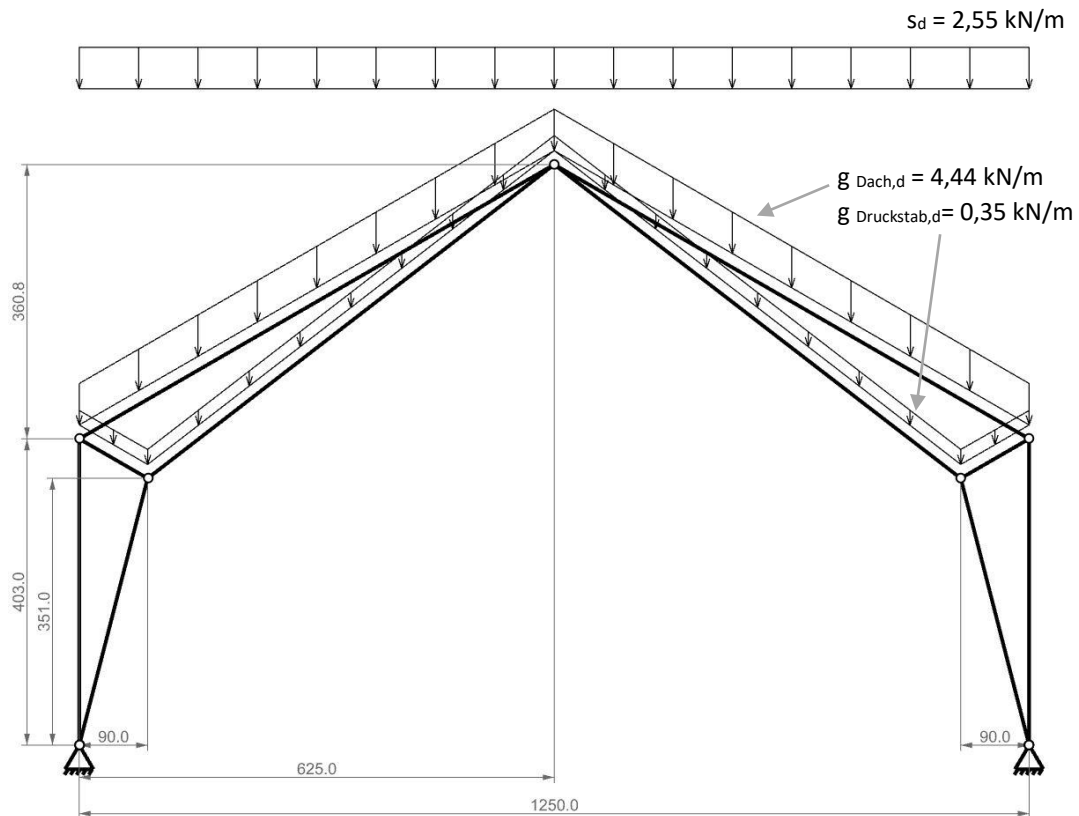


Abbildung 209: Statisches Modell der Hallenstruktur

Für die Bemessung der Knoten sind insgesamt 10 Lastfälle zu berücksichtigen (vgl. Tabelle 27). Die nachfolgenden Betrachtungen werden exemplarisch für den Lastfall 3 durchgeführt.

Tabelle 27: Mögliche Lastfälle

Lastfall	Eigenlast		Schnee		Wind	NKL 1	
						KLED	kmod
1	✓	+	-	+	-	ständig	0,6
2	✓	+	✓ (L)	+	-	kurz	0,9
3	✓	+	✓ (L+R)	+	-	kurz	0,9
4	✓	+	-	+	✓ (L)	k. sk.	1,0
5	✓	+	✓ (L)*	+	✓ (L)	k. sk.	1,0
6	✓	+	✓ (L)*	+	✓ (R)	k. sk.	1,0
7	✓	+	✓ (L+R)*	+	✓ (L)	k. sk.	1,0
8	✓	+	✓ (L)	+	✓ (L)*	k. sk.	1,0
9	✓	+	✓ (L)	+	✓ (R)*	k. sk.	1,0
10	✓	+	✓ (L+R)	+	✓ (L)*	k. sk.	1,0

L = links

R = rechts

* = Leiteinwirkung

Für eine Vorbemessung der Stabquerschnitte auf Biegung, Knicken und Abbrand wurden folgende Lasten zu Grunde gelegt:

6.3.5.2 Lastaufstellung

Schneelast für Diemerstein:

(Schneelastzone 2, Höhe 255 m ü. NN, Dachneigung 30°)

$$s_d = s_k^- \times e \times \mu_0 \times \gamma_F = 0,85 \frac{kN}{m^2} \times 2,5m \times 0,8 \times 1,5 = 2,55 \frac{kN}{m^2}$$

mit: s_d = Bemessungswert der Schneelast als Linienlast
 s_k^- = charakteristischer Wert der Schneelast als Flächenlast
 e = Lasteinzug
 μ_0 = Formbeiwert
 γ_F = Sicherheitsbeiwert

Eigenlast der Träger:

➤ Biegeträger Dach

$$g_{Biegeträger,d} = \rho_{Biegeträger,mean} \times b \times t \times \gamma_F$$
$$= 8 \frac{kN}{m^3} \times 0,2m \times 0,24m \times 1,35 = 0,52 \frac{kN}{m}$$

➤ Druckstäbe

$$g_{Druckstäbe,d} = \rho_{Druckstäbe,mean} \times b \times t \times \gamma_F$$
$$= 8 \frac{kN}{m^3} \times 0,2m \times 0,16m \times 1,35 = 0,35 \frac{kN}{m}$$

mit: $g_{Biegeträger,d}$ = Bemessungswert der Eigenlast des Biegeträgers
 $g_{Druckstäbe,d}$ = Bemessungswert der Eigenlast der Druckstäbe
 b, t = Querschnittswerte
 $\rho_{Biegeträger,mean} = \rho_{Druckstäbe,mean}$ = Holzdichte

Dachlast:

➤ Last Dachaufbau

(charakteristische Lasten gemäß Architektenplan)

$$g_{Dachaufbau,d} = g_{Dach,k}^- \times e \times \gamma_F$$
$$= 1,16 \frac{kN}{m^2} \times 2,5m \times 1,35 = 3,92 \frac{kN}{m^2}$$

mit: $g_{Dach,d}$ = Bemessungswert der Dachlast als Linienlast
 $g_{Dach,k}^-$ = charakteristischer Wert der Dachlast als Flächenlast

$$g_{Dach,d} = g_{Dachaufbau,d} + g_{Biegeträger,d} = 3,92 \frac{kN}{m^2} + 0,52 \frac{kN}{m^2} = 4,44 \frac{kN}{m^2}$$

Anmerkung:

Die Arbeit konzentriert sich im Folgenden ausschließlich auf den Spannungsnachweis der KP-Ringknoten. Die entsprechenden Nachweise für die nativen Stäbe (Normalkraft, Biegung, Knicken, etc.) sowie deren Anschlüsse untereinander (Fersenversätze) als auch die Auflageranschlüsse werden nicht explizit dargestellt. Aus diesem Grund werden in Abbildung 210 auch nur die Normalkräfte dargestellt.

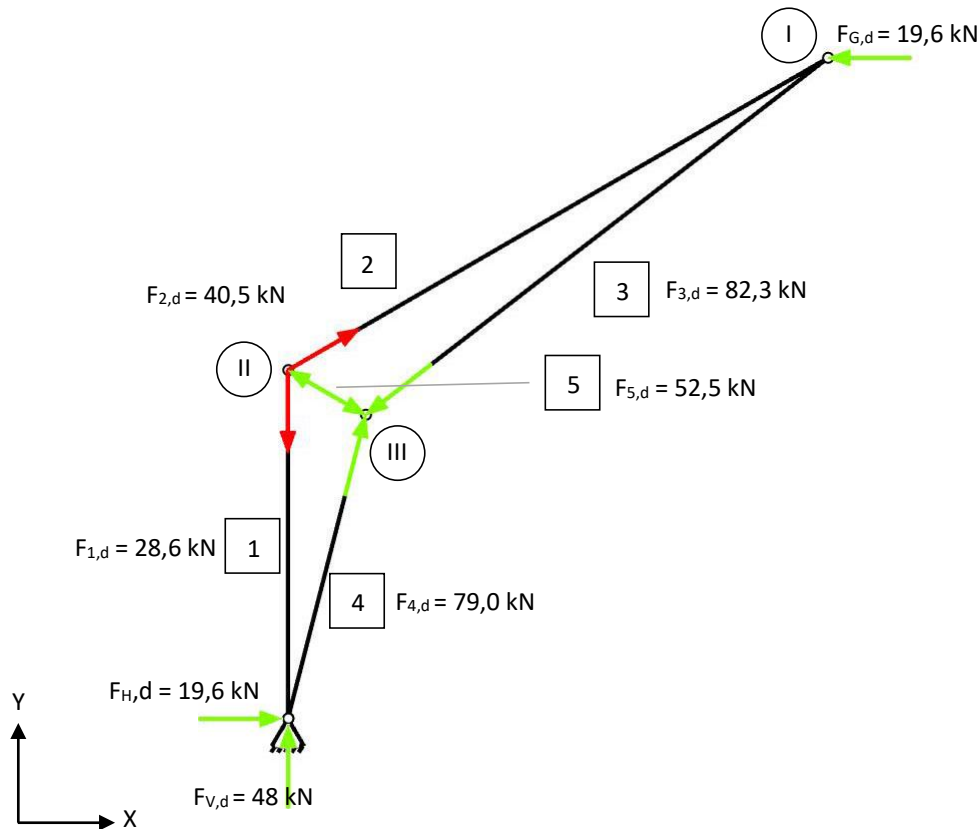


Abbildung 210: Stab-, Auflager- und Gelenkkkräfte

6.3.5.3 FE-Analyse der KP-Knoten

Für den Lastfall 4 wurden die Spannungsverläufe in den KP-Knoten mittels FE-Simulation (vgl. Abbildung 211, S. 226) ermittelt und die maßgebende Beanspruchung als Vergleichsspannung bestimmt. Die Verdrehung des Biegezugstabes 2 wurde bei der FE-Analyse vernachlässigt. Für KP wurden die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften angesetzt, die unter Kap. 6.3.3.2, S. 220 hergeleitet worden sind.

Die maximale Spannung innerhalb der KP-Knoten liegt

- für den Firstgelenkknoten (Knoten I) bei: $\sigma_{\text{von Mises}} = 3,5 \text{ N/mm}^2$
- für den Traufknoten (Knoten II) bei: $\sigma_{\text{von Mises}} = 91 \text{ N/mm}^2$
- für den Raumknoten (Knoten III) bei: $\sigma_{\text{von Mises}} = 11,6 \text{ N/mm}^2$

B: Statisch-mechanische Analyse
 Vergleichsspannung in den Knoten
 Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
 Einheit: MPa

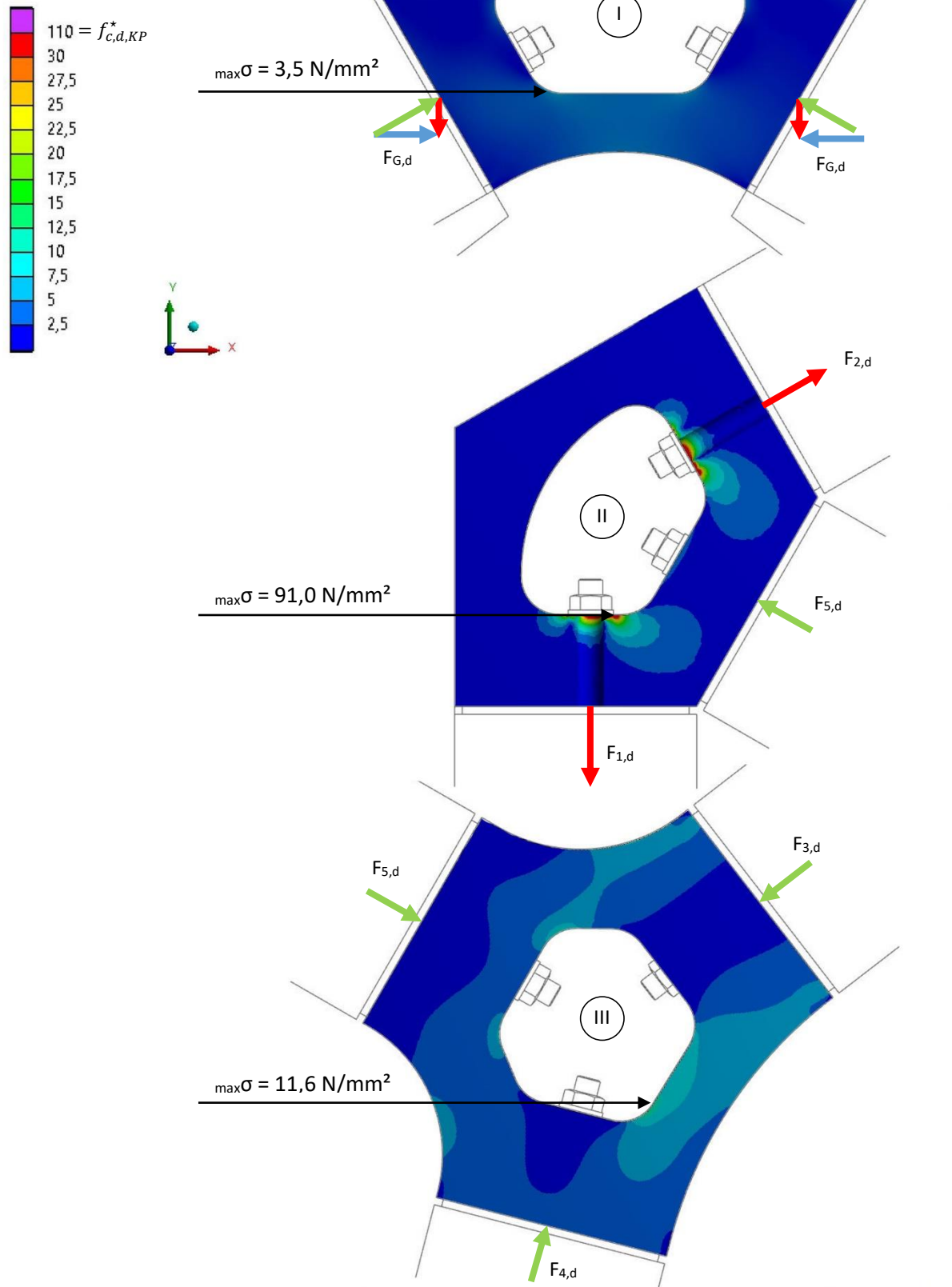


Abbildung 211: Spannungsverteilung als Vergleichsspannung im Firstgelenkknoten (oben), im Traufknoten (Mitte) und im Raumknoten (unten)

6.3.5.4 Interpretation der FE-Analyse

Für den Lastfall *Eigenlast + Schnee beidseitig* liegt die Klasse der Lasteinwirkungsdauer bei *kurz*. Für Nutzungsklasse 1 ergibt sich damit ein Modifikationsbeiwert k_{mod} von 0,9. Mit einem Material Sicherheitsbeiwert von $\gamma_M = 1,3$ liegt der Bemessungswert der Druckfestigkeit für BauBuche GL75 bei:

$$f_{c,0,d,GL75} = f_{c,0,k,GL75} \times k_{mod}/\gamma_M \\ \rightarrow 59,4 \frac{N}{mm^2} \times \frac{0,9}{1,3} = \mathbf{41,1 \frac{N}{mm^2}}$$

und für sternförmig aufgebautes KP BE 335-1 (*) bei:

$$f_{c,d,KP}^* = f_{c,k,KP}^* \times k_{mod}/\gamma_M \\ \rightarrow 162 \frac{N}{mm^2} \times \frac{0,9}{1,3} \sim \mathbf{110 \frac{N}{mm^2}}.$$

Die Spannungen in den Knoten liegen demnach unterhalb der jeweiligen Materialfestigkeiten. Die Firstgelenkknoten als auch die Raumknoten müssten für den untersuchten Lastfall nicht zwangsläufig aus einem vollimprägniertem KP ausgebildet werden; der Traufknoten allerdings schon. Unter der Annahme des unter Abbildung 203, S. 218 skizzierten Zusammenhangs aus Elastizität, Faserorientierung und Kraftrichtung, läge die charakteristische isotrope Druckfestigkeit für ein sternförmig aufgebautes Buchensperrholz bei:

$$f_{c,d,Buche}^* = f_{c,0,k} \times k_{mod}/\gamma_M = 36,2/mm^2 \times \frac{0,9}{1,3} \sim \mathbf{25 \frac{N}{mm^2}}$$

Somit wäre die Ausbildung der Knoten I und III prinzipiell auch in sternförmig aufgebaute Buchenfurniersperrholz aber auch – da Nutzungsklasse 1 - in nichtimprägniertem KP möglich.

6.3.5.5 Nachweis der Gewindestange

Die Grenzzugkraft beider Gewindestangen M16 8.8 beträgt:

$$F_{t,Rd} = 2 \times f_{y,d} \times A_{ef} / \gamma_M = 2 \times 0,8 \times 800 \frac{N}{mm^2} \times 157 mm^2 / 1,1 = \mathbf{182,6 kN} \gg F_{2,d} \checkmark$$

$F_{t,Rd}$	Tragfähigkeit der Gewindestange unter einer Zugbeanspruchung
$f_{y,d}$	Bemessungswert der Zugfestigkeit des Verbindungsmittels
A_{ef}	effektive Querschnittsfläche des Verbindungsmittels (Spannungsquerschnitt)
	hier: $A_{ef} = 157 mm^2$

6.3.5.6 Ermittlung der Einklebelänge

Für die Ermittlung der Einklebelänge wird die Grenzdrucktragfähigkeit des KPs unter der Unterlegscheibe angesetzt.

Die Grenzdrucktragfähigkeit der KP-Fläche unterhalb der Unterlegscheibe beträgt:

$$F_{c,Rd,KP}^* = A \times f_{c,d,KP}^* \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} = 480 mm^2 \times 110 \frac{N}{mm^2} \times \frac{0,9}{1,3} = \mathbf{36,6 kN}$$

$F_{c,Rd,KP}^*$ Tragfähigkeit des KPs unter einer Druckbeanspruchung

$$A = \pi \times (r_{au\beta en}^2 - r_{innen}^2) = \pi \times ((15 \text{ mm})^2 - (8,5 \text{ mm})^2) = 480 \text{ mm}^2$$

$r_{au\beta en}$ Außenradius der Unterlegscheibe

r_{innen} Innenradius der Unterlegscheibe

Eine etwaige Vergrößerung der Druckfestigkeit durch einen möglichen Einhängeneffekt wird zunächst nicht berücksichtigt, da eine Übertragung des Einhängeneffektes von nativem Holz auf KP nicht sichergestellt ist.

Die Einklebelänge berechnet sich mit:

$$F_{ax,Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{y,d} \times A_{ef} \\ \pi \times d \times l_{ad} \times f_{k1,d} \end{array} \right.$$

bzw. :

$$l_{ad} = \frac{F_{c,Rd,KP}}{\pi \times d \times f_{k1,k,BauBuche} \times k_{mod} / \gamma_M} = \frac{36,6 \text{ kN}}{\pi \times 16 \times 9,5 \times 0,9 / 1,3}$$

$$l_{ad} = 111 \text{ mm}$$

Die Mindesteinklebelänge $l_{ad,min}$ beträgt nach DIN EN 1995-1 NA, S. 95:

$$l_{ad,min} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,5 \times d^2 = 128 \text{ mm} \\ 10 \times d = 160 \text{ mm} \end{array} \right. \rightarrow \mathbf{160 \text{ mm}}$$

$F_{ax,Rd}$ Bemessungswert der Tragfähigkeit auf Herausziehen des Verbindungsmittels

d Nenndurchmesser des Stahlstabes

l_{ad} wirksame Einklebelänge des Stahlstabes

$f_{k1,d}$ Klebfugenfestigkeit mit $f_{k1,k,BauBuche} = 9,5 \text{ N/mm}^2$ nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung Z-9.1-705

Die Gewindestäbe müssen demnach mindestens 160 mm tief in die Stirnholzfläche eingebunden werden.

7 Schlussbetrachtung und Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Verstärkung von Bauteilanschlüssen mittels hochfestem KP an nativem Nadelholz bis Festigkeitsklasse C35 untersucht. Es wurde aufgezeigt, dass eine Verstärkung mit KP eine effektive Maßnahme zur Steigerung der Tragfähigkeit des Anschlussbereiches darstellt. Schwächungen durch Bohrungen für die Verbindungsmittel, wie Stabdübel und Bolzen oder durch Schlitz für die Verbindungsbleche, können aufgrund der hohen Festigkeit des KPs kompensiert werden, sodass die volle Tragfähigkeit des Bruttoquerschnitts des Stabes für den statischen Nachweis angesetzt und damit eine Bemessung auf den Spannungsnachweis bei Zugstäben und auf den Stabilitätsnachweis bei Druckstäben vereinfacht werden kann.

Aufgrund der hohen Härte und der hohen Formstabilität des Werkstoffs kann bei geeigneter Ausbildung der Anschlüsse eine zerstörungsfreie Demontage ebendieser und damit eine Wiederverwendung der Bauteile ermöglicht werden. Voraussetzung dafür ist, dass sich an den Verbindungsmitteln und an den zu verbindenden Querschnitten keine plastischen und somit irreversiblen Verformungen einstellen. Dies kann dadurch sichergestellt werden, dass die Verbindungsmittel aus hochwertigen Stählen gefertigt werden und die Verbindungsmittelschlankheit begrenzt wird.

Eine Wiederverwendung von Holzbauteilen wird nur dann möglich sein, wenn sich Tragstrukturen aus einzelnen Modulen zusammensetzen und damit auf gleichen Systemelementen aufbauen. Nur durch die Addition von Modulen zu einem Träger ist es möglich, ein und dasselbe Einzelelement für verschiedene Bauaufgaben mit unterschiedlichen Systemspannweiten (wieder-)einzusetzen. Stellvertretend für unterschiedliche Anwendungsbereiche KP-verstärkter Stäbe wurde die statische Leistungsfähigkeit exemplarisch an Fachwerkträgern bestimmt. Für die einzelnen Modulelemente, deren Länge einem Vielfachen des im Holzbau üblichen Grundmaß von 62,5 cm entspricht, wurden praktikable Bemessungstabellen entwickelt, aus denen sich, in Abhängigkeit der Systemspannweite und Belastungsgröße, der jeweilige Trägerabstand ableiten lässt. Für den Aufbau von Fachwerkträgern wurde exemplarisch das Potential für Spannweiten von 15 m bis zu 45 m aufgezeigt. Damit ist es möglich reversible Tragstrukturen für einen Großteil von standardisierten Hallenbauten, wie beispielsweise Reitsport- oder Schulsportshallen, Eishallen, Tennishallen und Multifunktionshallen anzubieten.

Die innerhalb der Arbeit vorgestellten Untersuchungsergebnisse belegen, dass eine dauerhafte Verklebung von KP und nativem Holz durch eine Keilzinkenverbindung unter Verwendung von PRF-Klebstoffen möglich ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass der charakteristische Wert der Zugfestigkeit von Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 zwischen Fichte ($\rho_{\text{mean}} = 0,477 \text{ g/cm}^3$) und KP (BE335-1 67 % L / 33 % Q) bei $f_{t,j,k} = 43,2 \text{ N/mm}^2$ und damit oberhalb des Festigkeitsniveaus von nativem Nadelholz bis Festigkeitsklasse C35 mit $f_{t,k} = 21 \text{ N/mm}^2$ liegt. Am Zinkenprofil I-20 wurde mit $f_{t,j,k} = 34,8 \text{ N/mm}^2$ ein Festigkeitsniveau dokumentiert, das ebenfalls eine Verklebung bis Festigkeitsklasse C35 ermöglicht. An den hybriden Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP ist aufgrund des unterschiedlichen hygroskopischen Werkstoffverhaltens sicherzustellen, dass das Schwinden des nativen Holzes zu keiner Schädigung der Klebverbindung führt. An Prüfkörpern, die einer zyklischen Befeuchtung ($u > 30 \%$) und Trocknung ($u = 0 \%$) unterzogen und die im Vorfeld der Prüfung auf eine Holzfeuchte von $u = 12\%$ konditioniert wurden, konnte mit Zunahme der Feuchte ein kontinuierlicher Abfall der Festigkeit der Keilzinkenverbindung beobachtet werden. Nach 15 Feuchtezyklen lag die charakteristische Biegezugfestigkeit bei nur noch 60 % des Kollektivs, das keinem Feuchtewechsel ausgesetzt war. Um die Schädigung der Klebfuge zu unterbinden, wurden verschiedene Ansätze erarbeitet, die die

Dauerhaftigkeit der Klebverbindung gewährleisten können, indem beispielsweise Feuchteveränderungen durch den Einsatz hydrophobierender Anstriche gehemmt werden. Zudem wurden für die Keilzinkenverklebung zulässige Obergrenzen der Holzfeuchte der nativen Hölzer, in Abhängigkeit der späteren Bauteilnutzung, definiert.

KP weist mit Lochleibungsfestigkeiten von bis zu 238 N/mm^2 ($d = 20 \text{ mm}$) eine um mehr als 10-fach höhere Lochleibungsfestigkeit als natives Fichtenholz auf. Aus diesem Grund kann mit verstärkten Stäben, bei gleichem Verbindungsmitteldurchmesser, die Anzahl der für die Verbindung notwendigen Verbindungsmittel auf ein Minimum reduziert werden. Jedoch ist zu beachten, dass dann die Verbindungsmittel deutlich stärker beansprucht werden als es bei Weichhölzern der Fall ist. Ein Schlankheitsgrad von $\lambda = t/d = 3,5 - 4,5$, wie er beispielsweise für Verbindungsmittel in Nadelholz möglich ist, führt im KP-verstärkten Bauteilanschluss zum vollständigen Plastifizieren der Verbindungsmittel. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass eine zerstörungsfreie Demontage der einzelnen Modulelemente nicht mehr möglich ist. Um eine möglichst gleichmäßige und ausschließlich elastische Beanspruchung ohne plastische Verformungen des Verbindungsmittels als auch der Lochleibung zu erzeugen, muss die Schlankheit der Verbindungsmittel auf ca. $\lambda = 1,25 - 1,5$ begrenzt werden. Gleichzeitig müssen die Verbindungsmittel aus hochwertigen Stählen (z. B. 16 MnCr5) gefertigt werden, um ein frühes Plastifizieren zu verhindern. Aus diesem Grund macht in erster Linie der Einsatz gedrungener und hochfester Verbindungsmittel in geringschnittigen Verbindungen oder der Einsatz schlanker und hochfester Verbindungsmittel in vielschnittigen Verbindungen Sinn.

Es wurde der Nachweis erbracht, dass unter Einhaltung eines Randabstands von $a_3 = 1,5 \times d$, $a_4 = 2,5 \times d$ und $t = 1,5 \times d$ die Tragfähigkeit unter einer Normalkraftbeanspruchung durch ein einziges stiftförmiges Verbindungsmittel bis $d = 60 \text{ mm}$ als Lochleibungsanschluss übertragen werden kann.

Durch die - im Vergleich zu nativem Holz - enorme Querdruckfestigkeit bietet die Verwendung von KP die Möglichkeit des Einsatzes vorgespannter Schrauben zur Realisierung gleitfester Anschlüsse. Innerhalb der Arbeit wurde das große Potential dieser Anschlussart verdeutlicht, da sie zum einen hohe Anschlussfestigkeiten, zum anderen aber auch große Bauteiltoleranzen bei hoher Anschlusssteifigkeit ermöglicht. Jedoch hat sich gezeigt, dass die untersuchten Verbindungselemente, insbesondere das Flächenrändel, zu optimieren sind; hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Weil das Entwerfen mit Grundmodulen die Gestaltungsfreiheit von Architektinnen und Architekten einschränkt, wurden zusätzlich reversible Freiformanschlüsse mit KP-Ringknoten entwickelt. Mit ihnen können Stäbe unterschiedlicher Länge und unterschiedlichen Querschnitts sowie unter unterschiedlichen Winkeln gestoßen werden. Die Grundlagen der Knotengestaltung wurden erläutert und die Möglichkeit der numerischen Spannungsanalyse wurde anhand eines realen Bau-Projektes vorgestellt. Darüber hinaus wurden die Materialparameter für sternförmig aufgebautes KP-Sperrholz als auch für sternförmig aufgebautes BauBuchensperrholz theoretisch hergeleitet. Bis zur Verifizierung der mechanischen Kennwerte durch Material- und Bauteilversuche im Maßstab 1/1 sollte ein Spannungsnachweis mit einem ausreichend großen Aufschlag der Materialsicherheitsbeiwerte erfolgen.

Mit dieser Arbeit wurde die Grundlage zur Bemessung von Holztragwerken mit Knotenverstärkungen aus KP geschaffen.

8 Literaturverzeichnis

- Aicher & Klöck, 1990 Aicher, S. & Klöck, W. (1990). Spannungsberechnungen zur Optimierung von Keilzinkenprofilen für Brettschichtholz-Lamellen. In: Bauen mit Holz, Jg.92, Nr.5, S. 356 - 358, 360 - 362.
- Aicher & Radovic, 1999 Aicher, S. & Radovic, B. (1999). Untersuchungen zum Einfluss der Keilzinkengeometrie auf die Zugfestigkeit keilgezinkter Brettschichtholz-Lamellen. In: Holz als Roh- und Werkstoff 57, S. 1 - 11.
- Aigner et al., 2009 Aigner, T., Aigner, M., Joscak, T., Barbu, M.C., Schrenk, M. (2009). Bessere Keilzinkenstöße für Brettspertholz. In: Holz-Zentralblatt Nummer 48, S. 1219 - 1220.
- Arbeitsgemeinschaft Holz (1974) Arbeitsgemeinschaft Holz e. V. (Hrsg.) (1974). Informationsdienst Holz. Greimbau. Bd. A 56. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., München.
- Bachler 2009 Bachler, O. Marketing im Holzbau – Das Marketingverständnis der Klein- und Mittelunternehmen. In: Schwaner, K. (Hrsg.) (2009). Zukunft Holz - Querschnittsbericht und Entwicklungspotenziale. Biberach: S. 91 – 94, Eigenverlag.
- Baensch, 2015 Baensch, F. (2015). Damage evolution in wood and layered wood composites monitored in situ by acoustic emission, digital image correlation and synchrotron based tomographic microscopy. Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- Blaß, 2009 Blaß, H.J. Holzbauweisen, Holzbausysteme, Fachwerkträger. In: Schwaner, K. (Hrsg.) (2009). Zukunft Holz - Querschnittsbericht und Entwicklungspotenziale. Biberach: S. 1171 – 1174, Eigenverlag.
- Blaß et al., 2005 Blaß, H. J., Denzler, J., Frese, M., Glos, P., Linsenmann, P. (2005). Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Band 1 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Blaß & Frese, 2006 Blaß, H.J. & Frese, M. (2006). Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche. In: Holz als Roh- und Werkstoff 64, S. 433 - 443.
- Bosshard, 1984 Bosshard, H. (1984). Holzkunde: Band 2. Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2., überarbeitete Auflage. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Buchmann, 1934 Buchmann, W. (1934). Die Kerbempfindlichkeit der Werkstoffe. In: Forschung 5. Bd./ Heft 1., S. 36 - 48.
- Bürgel, 2005 Bürgel, R. (2005). Festigkeitslehre und Werkstoffmechanik. Band 2. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.

Bustos et al., 2004	Bustos, C., Hernández, R. E., Beauregard, R., Mohammad, M. 2004). Influence of Machining Parameters on the structural Performance of Finger-Joined Black Spruce. In: Wood And Fiber Science, V. 36(3), S. 359 - 367.
Castro & Paganini, 1997	Castro, G., Paganini, F. (1997). Parameters Affecting Finger Joint Performance in Poplar Wood. In: International Conference of IUFRO S 5.02 Timber Engineering. Kopenhagen, Dänemark, ohne Seitenzahl.
Colling, 2008	Colling, F. (2008). Holzbau: Grundlagen, Bemessungshilfen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
Colling, 2012	Colling, F. (2012). Grundlagen und Bemessung nach EC 5. 3. Auflage. Wiesbaden: Springerverlag.
Colling et al., 2013	Colling, F., Blaß, H.J., Prüfer, C. (2013). Tragfähigkeit von Stabdübelverbindungen. Forschungsbericht, Augsburg: Hochschule Augsburg, Eigenverlag.
Dietsch, 2014	Dietsch, P. Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brett-schichtholzbauteile. In: Görlacher, R. (2014). Karlsruher Tage 2014 – Holzbau: Forschung für die Praxis. Karlsruhe: S. 1-22. KIT Scientific Publishing.
Ebert et al., 2014	Eber, A., Glienke, R., Wanner, M.-C. (2014). Aktuelle Anforderungen an die mechanische Füge-technik im Stahl- und Metallleichtbau für Solar- und Windenergieanlagen. In: DVS Congress 2014. Berlin, S. 210 - 220.
Ehlbeck et al., 1985	Ehlbeck, J., Colling, F., Görlacher, R. (1985). Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. In: Holz als Roh- und Werkstoff 43, S. 369 - 373.
Ehlbeck & Eberhart, 1989	Ehlbeck, J. & Eberhart O. (1989). Entwicklung und Prüfung neuer Verbindungsmittel aus Hartholz, Pressschichtholz und ähnlichen holzhaltigen Werkstoffen für tragende Verbindungen im Holzbau. Forschungsbericht F 2137, Karlsruhe: Univ. Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Fraunhofer IRB Verlag.
Ehlbeck & Hättich, 1986	Ehlbeck, J. & Hättich, R. (1986). Physikalische, insbesondere mechanische Eigenschaften von Kunstharz-Preßholz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 44, S. 449 - 452.
Ehlbeck & Werner, 1992	Ehlbeck, W., Werner, H. (1992). Softwood and hardwood embedding strength for dowel-type fasteners. In: Proceedings of CIB-W18. Åhus, Schweden, Paper 25-87-2.
Ehlbeck & Werner, 1994	Ehlbeck, J. & Werner, H. (1994). Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln. Forschungsbericht T 2636, Karlsruhe: Univ. Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abteilung für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Fraunhofer IRB Verlag.

Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (1991)

- Entwicklungsgemeinschaft Holzbau (Hrsg.) (1991). Informationsdienst Holz. Holzbau Handbuch, Reihe 2 Tragwerksplanung, Teil 2 Verbindungsmittel, Folge 2 - Genauere Nachweise, Sonderbauarten. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., München.
- Fahlbusch, 1951 Fahlbusch, H. (1951). Die Tragfähigkeit von Bolzen in Holz bei statischer Belastung. In: Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A., S. 83 - 93.
- Fick, 1855 Fick, A. (1855). Über Diffusion. In: Poggendorff's Annalen der Physik. 94, S. 59 - 86.
- Fortuin, 2003 Fortuin, G. (2003). Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz. Dissertation. Hamburg: Universität Hamburg.
- Franke et al., 2013 Franke, B., Schusser, A., Müller, A. (2013). Laubholz in Tragwerken - Der Keilzinkenstoss als Schlüsselement. Forschungsbericht Nr. 2831-SB-01, Bern: Berner Fachhochschule- Architektur, Holz und Bau - Abteilung F+E, Holz und Verbundbau, Eigenverlag.
- Frese, 2006 Frese, M. (2006). Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Dissertation. Band 5 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.
- Furuno et al., 2004 Furuno, T., Imamura, Y., Kajita, H. (2004). The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls. In: Wood Sci Technol 37, S. 349 – 361.
- Gamper et al., 2012 Gamper, A., Dietsch, P., Merk, M. (2012). Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Forschungsbericht F 2816, München: Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Fraunhofer IRB Verlag.
- Gehri, 1980 Gehri, E. (1980). Betrachtungen zum Tragverhalten von Bolzenverbindungen im Holzbau. In: Schweizer Ingenieur und Architekt 51-52, S. 1336 - 1344.
- Glos & Fuchs, 1987 Glos, P & Fuchs, H. (1987). Untersuchung von Möglichkeiten zur Keilzinkung von Kantholz im halbtrockenen Zustand (Feuchtegehalt bis 30 %). Forschungsbericht T 2002, München: Institut für Holzforschung, Universität München, Fraunhofer IRB Verlag.
- Glos & Henrici, 1990 Glos, P. & Henrici, D. (1990). Festigkeit von Bauholz bei hohen Temperaturen. Forschungsbericht T 2219, München: Institut für Holzforschung der Universität München, Fraunhofer IRB Verlag.
- Glos & Schulz, 1986 Glos, P. & Schulz, H. (1986). Qualität und Festigkeit von Bauschnittholz aus Waldschadensgebieten. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 44 (8), S. 293 – 298.

- Görlacher, 1990 Görlacher, R. (1990). Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Goris, 2012 Goris, A. (Hrsg.) (2012). Schneider - Bautabellen für Ingenieure. 20. Auflage. Siegen: Werner Verlag.
- Graf & Egner, 1938 Graf, O. & Egner, K. (1938). Versuche mit geleimten Laschenverbindungen aus Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 1. Jg., Heft 12, S. 460 - 464.
- Graf et al., 2018 Graf, J., Schnell, J., Enneking, N., Klopfer, R., Röver, D., Weisgerber, C. (2018). Entwicklung neuartiger Holz-Beton-Verbundbrücken aus Laub-Brettschichtholz und Faserbeton. Forschungsbericht (in Bearbeitung), Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl Tragwerk und Material.
- Graf, Röver & Schmeing, 2016 Graf, J., Röver, D., Schmeing, M. (2016). Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken. Forschungsbericht (unveröffentlichter Zwischenbericht), Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl Tragwerk und Material.
- Graf, Röver & Schmeing, 2018 Graf, J., Röver, D., Schmeing, M. (2018). Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken. Forschungsbericht (unveröffentlichter Abschlussbericht), Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl Tragwerk und Material.
- Habenicht, 1997 Habenicht, G. (1997). Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin: Springer Verlag.
- Haller et al., 2015 Haller, P., Heiduschke, A., Putzger, R., Hartig, J. (2014). KP zur Verstärkung von Brettschichtholz. In: Bautechnik 92 (2015), Heft 1, S. 28 – 35.
- Hamann & Kubowitz, 2011 Hamann, M., Kubowitz, P. Kriechen von KP. In: Haller, P., Chokri, C., Günther, E., Heiduschke, A., Held, C.P., Herrmann, G., Hufenbach, W., Manthey, C., Putzger, R., Trümper, W., Hamann, M., Birk, T., Kubowitz, P., Lemke, Y., Schäcke, A., Untergutsch, A., Hofmann, M., Fandler, J., Thompson, R. (Hrsg.) (2011). Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0330722A-C. Dresden: S. 120 – 136, Eigenverlag.
- Hartmann, 1939 Hartmann, F. (1939). Die Festigkeit von geleimten Laschenverbindungen aus Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 1. Jg., Heft 5, S. 109 - 116.

- Heiduschke, 2011 Heiduschke, A. Verbindungen mit Pressholz und technischen Textilien - Gelenkverbindungen. In: Haller, P., Chokri, C., Günther, E., Heiduschke, A., Held, C.P., Herrmann, G., Hufenbach, W., Manthey, C., Putzger, R., Trümper, W., Hamann, M., Birk, T., Kubowitz, P., Lemke, Y., Schäcke, A., Untergutsch, A., Hofmann, M., Fandler, J., Thompson, R. (Hrsg.) (2011). Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0330722A-C. Dresden: S. 147 – 181, Eigenverlag.
- Holic, 2016 Holic, Z. (2016). Einflussfaktoren auf das Tragverhalten einer Stabdübelverbindung. Bestimmung des Reibungsbeiwertes zwischen Stabdübel und umgebendem Holz. Masterarbeit. Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz.
- Hollmann, 2011 Hollmann, D.W. (2011). Grundlagen und Ingenieurmodell für den Nachweis von Holzbauteilen mit Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen. Dissertation. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Braunschweig: TU Braunschweig.
- Hübner, 2013 Hübner, U. (2013). Mechanische Kenngrößen von Buchen, Eschen- und Robinienholz für lastabtragende Bauteile. Dissertation. Graz: Institut für Holzbau und Holztechnologie der TU Graz.
- Ivansson & Ström, 1968 Ivansson, B.O. & Ström, H. (1968). Das Keilzinken von Holz - Zweite Mitteilung: Grundlegende Untersuchungen zu einem neuen Verfahren der Keilzinkung. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 26, Heft 3, S. 77 - 84.
- Johansen, 1949 Johansen, K.W. (1949). Theory of Timber Connections. In: International Association of Bridge and Structural Engineering. Basel, Schweiz, Publication No. 9: 249-262
- Kister, 2009 Kister, J. (Hrsg.) (2009). Neufert. Bauentwurfslehre. 39. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag.
- Klöck, 2004 Klöck, W. (2004). Bestimmung charakteristischer Rechenwerte von Bauholz für Tragende Zwecke. In: Otto-Graf-Journal Vol. 15, S. 43 - 58.
- Kollmann, 1951 Kollmann, F. (1951). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe (2. Ausg., Bd. 1). Berlin: Springer Verlag.
- Kollmann, 1952 Kollmann, F. (1952). Über die Abhängigkeit einiger mechanischer Eigenschaften der Hölzer von der Zeit, von Kerben und von der Temperatur. Dritte Mitteilung: Die Bedeutung der Temperatur für die Elastizität und Festigkeit des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 10. Jg., Heft 7, S. 269 - 279.

- Kollmann, 1955 Kollmann, F. (1955). Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe: Band 2: Holzschutz, Oberflächenbehandlung, Trocknung und Dämpfen, Veredelung, Holzwerkstoffe, spanabhebende und spanlose Holzbearbeitung, Holzverbindungen, 2. Auflage, Berlin: Springer Verlag.
- Leijten, 1999 Leijten, A.J.M. (1999). Locally reinforced timber joints with expanded tube fasteners. In: HERON, Vol. 44, No. 3, S. 131 -161.
- Lewark, 1982 Lewark, S. (1982). Untersuchungen von Holzmerkmalen junger Fichten aus Stecklingsklonen. In: Forstarchiv 53, S. 14-21.
- Ludwig, 2015 Ludwig, P. (2015). Bericht: Zugversuche mit Keilzinkenverbindungen. Unveröffentlichter Prüfbericht im Rahmen des Forschungsprojektes: Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken.
- Marian, 1968 Marian, J.-E. (1968). Das Keilzinken von Holz - Erste Mitteilung: Ein neues Verfahren für die Keilzinkung von Holz und seine Grundlagen. In: Holz als Roh- und Werkstoff. Bd. 26, Heft 2, S. 41 - 45.
- Möhler & Steck, 1980 Möhler, K. & Steck, G. (1980). Untersuchungen über die Rissbildung in BSH infolge Klimabeanspruchung. In: Bauen mit Holz (4/80), S. 194 - 200.
- Mohammad & Quenneville, 1998 Mohammad M. & Quenneville, H.J.P. (1998). Influence of cyclic loads on strength and stiffness of bolted timber connections. In: Proceedings, 5th World Conference on Timber Engineering, Band 2. Montreux, Schweiz, S. 375 - 382.
- Morsing & Hoffmeyer, 1998 Morsing, N. & Hoffmeyer, P. (1998). Densification of Wood.: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to grain. (BYG-Rapport; No. R-79), Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (DTU), Eigenverlag.
- Müller et al., 2014 Müller, U., Gindl-Altmutter, W., Konnerth, J., Obersiebnig, M., Frybort, S., Steiner, G., Stingl, R. (2014). Einfluss der lokalen Polarität auf die Verklebung von Holz. In: Kooperationsforum - Kleben von Holz und Holzwerkstoffe - Bayern Innovativ. Würzburg, ohne Seitenzahl.
- Neuhaus, 2017 Neuhaus, H. (2017). Ingenieurholzbau. Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Niemz & Allenspach, 2009 Niemz, P. & Allenspach, K. (2009). Untersuchungen zum Einfluss von Temperatur und Holzfeuchte auf das Versagensverhalten von ausgewählten Klebstoffen bei Zugscherbeanspruchung. In: Bauphysik 31, Bd. 5, S. 296 - 304.
- Perkitny & Hoffmann, 1976 Perkitny, T. & Hoffmann, Z. (1976). Zur Relaxation von Holz nach verschieden langer, konstanter Durchbiegung. In: Holz als Roh- und Werkstoff, 34. Jg. S. 167-170.
- Pierce, 1976 Pierce, C.B. (1976). The Weibull distribution and the determination of its parameters for application to timber strength data. BRE, CP 26/76. Building Research Establishment, Princes Risborough Laboratory.

- Putzger (2), 2011 Putzger, R. Untersuchungen zur Maß- und Formhaltigkeit (verschiedene Bauteile). In: Haller, P., Chokri, C., Günther, E., Heiduschke, A., Held, C.P., Herrmann, G., Hufenbach, W., Manthey, C., Putzger, R., Trümper, W., Hamann, M., Birk, T., Kubowitz, P., Lemke, Y., Schäcke, A., Untergutsch, A., Hofmann, M., Fandler, J., Thompson, R. (Hrsg.) (2011). Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0330722A-C. Dresden: S. 88 – 97, Eigenverlag.
- Putzger, 2011 Putzger, R. Ermittlung von Materialparametern – Quellungsdrücke von Fichten- und Fichtenpressholz in Wasser. In: Haller, P., Chokri, C., Günther, E., Heiduschke, A., Held, C.P., Herrmann, G., Hufenbach, W., Manthey, C., Putzger, R., Trümper, W., Hamann, M., Birk, T., Kubowitz, P., Lemke, Y., Schäcke, A., Untergutsch, A., Hofmann, M., Fandler, J., Thompson, R. (Hrsg.) (2011). Hochleistungsholztragwerke – HHT – Entwicklung von hochbelastbaren Verbundbauweisen im Holzbau mit faserverstärkten Kunststoffen, technischen Textilien und Formpressholz. Abschlussbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben 0330722A-C. Dresden: S. 113 – 119, Eigenverlag.
- Rammer & Winistorfer, 2011 Rammer, D.R. & Winistorfer, S.G. (2011). Effect of moisture content on dowel-bearing strength. In: Wood and Fiber Science 33, Nr. 1, S. 126 - 139.
- Reeb et al., 1999 Reeb, J.E., Karchesy, J.J., Foster, J.R., Krahmer, R.L. (1999). Finger-joint quality after 4, 6, and 32 hours of knife wear: Preliminary results. In: Forest Products Journal. Jul/Aug98, Vol. 48 Issue 7, S. 33 - 36.
- Röver, 2017 Röver, D. Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken. In: Fachbereich Architektur (2017). Jahrbuch 2018. Fachbereich Architektur, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern: S. 88 – 91, Eigenverlag.
- Rug, 1985 Rug, W. (1985). Mitteilung Nr. 1/85 des Fachausschusses Ingenieurholzbau und des Instituts für Industriebau. III. Holzbauseminar 1984. Eigenverlag. Berlin.
- Niemz & Sonderegger, 2017 Niemz, P. & Sonderegger, W. (2017). Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. München: Carl Hanser Verlag.
- Rug & Mönck, 2015 Rug, W. & Mönck, W. (2015). Holzbau, Bemessung und Konstruktion. 16., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin: Beuth Verlag.
- Schäfer, 1952 Schäfer, W. (1952). Die Wirkung von Kerben bei statischer Zugbeanspruchung. In: Konstruktion 4, (1952) Heft3, S. 71 - 77.
- Schaffrath, 2015 Schaffrath, J. (2015). Untersuchungen zu Feuchtetransportvorgängen und feuchteinduzierten Verformungen sowie Spannungen bei Betrachtung verschiedener Holzarten und unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen. Dissertation. München: Technische Universität München.

- Scheiding et al., 2016 Scheiding, W., Grabes, P., Hausten, T., Haustein V. H., Nieke, N., Urban, H., Weiß, B. (2016). Holzschutz. Holzkunde – Pilze und Insekten – Konstruktive und chemische Maßnahmen – Technische Regeln – Praxiswissen. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.
- Schickhofer, 2006 Schickhofer, G. (2006). Das schwächste Glied in der Kette bestimmt den Level. In: 12. Internationales Holzbau-Forum. Garmisch-Partenkirchen.
- Schmid, 2002 Schmid, M. (2002). Anwendung der Bruchmechanik auf Verbindungen mit Holz. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- Schwaner, 2009 Schwaner, K. (Hrsg.) (2009). Zukunft Holz - Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung künftiger Entwicklungspotenziale. Forschungsbericht 54-8214.07 IV/59-15, Biberach: Institut für Holzbau Hochschule Biberach, Eigenverlag.
- Serrano & Sjödin, 2007 Serrano, E. & Sjödin, J. (2007). Dowel type joints – Influence of moisture changes and dowel surface smoothness. In: COST Action E55. Eindhoven, Niederlande, ohne Seitenzahl.
- Song, et al., 2018 Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., Li, Y., Kuang, Y., Li, Y., Quispe, N., Yao, Y., Gong, A., Leiste U.H., Bruck, H.A., Zhu, J.Y., Vellore, A., Li, H., Minus, M.L., Jia, Z., Martini, A., Li, T., Hu, L., (2018). Processing bulk natural wood into a high performance structural material. In: nature25476, S. 224 – 228.
- Stahl, 2015 Stahl, J.A. (2015). Lochleibungsbemessung bei I-förmigen Biegeträgern aus Holz und transparenten Thermoplasten im statischen Verbund. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Staib et al., 2008 Staib, G., Dörrhöfer, A., Rosenthal, M. (2008). Elemente + Systeme: modulares Bauen; Entwurf, Konstruktion, neue Technologien. München: Ed. Detail - Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation – Basel: Birkhäuser Verlag.
- Stamm & Seborg, 1941 Stamm, A. J. & Seborg, R.M. (1941). Resin-Treated, Laminated, Compressed Wood. United States Department Of Agriculture. Forest Service. Forrest Products Laboratory. Madison Wisconsin: Springer-Verlag.
- Steiger, 2012 Steiger, R. (2012). In Brettschichtholz eingeklebte Gewindestangen – Stand des Wissens zu einer leistungsfähigen Verbindungstechnik. In: 18. Internationales Holzbau-Forum 2012, ohne Seitenzahl.
- Toratti & Svensson, 2000 Toratti, T. & Svensson, S. (2000). Mechano-sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. In Wood Science and Technology 34, S. 317-326.
- Trübswetter, 2009 Trübswetter, T. (2009). Holz Trocknung. Verfahren zur Trocknung von Schnittholz – Planung von Trocknungsanlagen. 2., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag.

- Volkmer et al., 2017 Volkmer, T.; Lehmann, M.; Clerc, G. (2017). Brettschichtholz aus Buche: Keilzinkenverbindung und Flächenverklebung. In: Internationales Holzbau-Forum IHF 2017. Garmisch-Partenkirchen, ohne Seitenzahl.
- Ylinen, 1957 Ylinen, A. (1957). Zur Theorie der Dauerstandfestigkeit des Holzes. In: Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 15, H.5, S. 213 - 214.

8.1 Quellen aus dem Internet

- Blaß, Schmid & Werner, 2001 Blaß, H.J., Schmid, M., Werner, H. (2001). Verstärkung von Verbindungen. Online unter: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/12432001/2428296> (Stand: 15.02.2019)
- Deho-1, 2019 Herstellerangabe. Online unter: <https://www.dehonit.de/dehonit-kunstharzpressholz/fuer-mechanische-beanspruchungen/> (Stand: 27.09.2019)
- dehonit, 2018 Schmeing GmbH & Co. KG (2018). dehonit® KP Informationen Online unter: http://www.dehonit.de/wp-content/uploads/2018/06/dehonit-KP_de.pdf (Stand: 27.07.2019)
- digitales bauen GmbH, 2008 digitales bauen GmbH (2008). Modulares Bauen. Ein Kostenvergleich. Online unter: http://www.digitales-bauen.de/pdf/Kostenvergleich_ModularesBauen_090128.pdf (Stand: 14.03.2019)
- Franke, 2010 Franke, W. (2010). Ingenieurholzbau. Bemessungshilfen, Band 1. Eigenverlag. Online unter: https://opus.htwg-konstanz.de/files/99/Ingenieurholzbau_Bemessungshilfen_Band1_20100316.pdf (Stand: 12.05.2019)
- Hartmann et al., 2017 Hartmann, H; Pfeifle, R.; Dorsch, F.; Holm, A.; Meier, K.; Meilinger, J.; Scherer, J. (2017). Nagelplattenkonstruktionen nach Eurocode. In Gütegemeinschaft Nagelplattenprodukte e. V. (Hrsg.). Holzbau Handbuch - Reihe 2 - Teil 1 - Folge 3. Online unter: <https://informationsdienst-holz.de/publikationen/> (Stand: 17.05.2019)
- Herstellerangabe 1 Schmeing GmbH & Co. KG (2019). Qualitäten für mechanische Beanspruchungen. Online unter: <http://www.dehonit.de/dehonit-KP/fuer-mechanische-beanspruchungen/> (Stand: 27.07.2019)
- Herstellerangabe 2 Schmeing GmbH & Co. KG (2019). Qualitäten für den Transformatorenbau. Online unter: <http://www.dehonit.de/dehonit-KP/fuer-den-transformatorbau/> (Stand: 27.07.2019)
- Hexion, 2019 Datenblatt Bakelite PF 31-PF-X. Online unter: <https://www.campusplastics.com/material/pdf/60164/BakelitePF31?sLg=de> (Stand: 10.12.2019)

- Kessel, 2014 Kessel, M. H. (2014). Skript zur Vorlesung Bauteile aus Holz und ihre Verbindungen. WS 2014/2015. Online unter: www.ibholz.tu-bs.de/cms/lehre/Bauko_WS_1415.pdf (Stand: 10.02.2015)
- Loba, 2018 LOBA GmbH & Co. KG (2018). Diffusionsverhalten von Parkettversiegelungen. Online unter: https://www.loba.de/fileadmin/site_structure/produkte/000000/de/TTT_DE_Diffusionsverhalten_von_Parkettlackierungen_180821.pdf (Stand: 30.07.2019)
- Musterbauordnung – MBO, 2002 IS-ARGEBAU (2002). MBO, Fassung 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008. www.bauministerkonferenz.de. Online unter: <https://www.is-ergebau.de> (Stand: 14.02.2019)
- Niemz, 2011 Niemz, P. (2011). Skript zur Vorlesung Werkstoffe I (Materialeigenschaften) Teil Holz und Holzwerkstoffe. Institut der Baustoffe, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Online unter: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ifb/ifb-dam/homepage-IfB/Education/bsc_courses/bsc-materials-I/documents/Werkstoffe1_Holz2011.pdf (Stand: 14.02.2019)
- Pertschi, 2006 Pertschi, O. (Hrsg.) (2006). Reden und Aufsätze 71. Zum Gedenken an Otto Graf, universeller Bauforscher in Stuttgart. Stuttgart. Online unter: https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/6064/1/Reden_und_Aufsaeetze_71_Otto_Graf_Reinhardt.pdf (Stand: 31.07.2019)
- StVZO, 2019 Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung vom 26. April 2012 (BGBl. I S. 679), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 26. November 2019 (BGBl. I S. 2015) geändert worden ist. Online unter: https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/BJNR067910012.html (Stand: 31.07.2019)
- Trayer, 1932 Trayer, G.W. (1932). The bearing strength of wood under bolts. United States Department of Agriculture. Washington, D. C., Technical Bulletin No. 332. Online unter: <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT86200326/PDF> (Stand: 31.07.2019)
- Wegener; Pähler; Tratzmiller, 2010 Wegener, G.; Pähler, A.; Tratzmiller, M. (2011). Ein Leitfaden. Zweite Auflage, Juli 2010. Holzforschung München. Online unter: <http://www.forstundholz-ufr.de/images/Dokumente/Broschueren/broschuere-bauen-mit-holz-klimaschutz.pdf> (Stand: 01.03.2019)
- Würth, 2019 Würth GmbH & Co. KG (2019). 8. STAHLBAU. 8.1 HV-Verbindungen für den Stahlbau. Online unter: https://www.wuerth-industrie.com/web/media/de/pictures/wuerthindustrie/technikportal/dinokapitel/Kapitel_08_DINO_techn_Teil.pdf (Stand: 29.07.2019)

8.2 Mündliche Quellen

Schmeing, 2017	Informationen aus verschiedenen Unterredungen mit Mark Schmeing, Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH und Co. KG, Kirchhundem im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes <i>Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken</i> .
Obenauer, 2015	Aus Gesprächsprotokoll zur telefonischen Anfrage vom 24.11.2015 an Jörg Obenauer, Grecon.

8.3 Normen

DIN 82, 1973	DIN 82:1973-01 (1973). Rändel. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 1052	DIN 1052:2008:12. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 4074-1, 2012	DIN 4074-1:2012-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadel schnittholz. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 4102, 1998	DIN 4102-1:1998-05. Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 1: Baustoffe; Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 6796, 1987	DIN 6796:1987-10. Spannscheiben für Schraubenverbindungen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 7707-2, 1979	DIN 7707-2:1979-01. Kunstharz-Preßholz und Isolier-Vollholz. Typen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 18203-3, 2008	DIN 18203-3:2008-08. Toleranzen im Hochbau – Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 52185, 1976	DIN 52185:1976-09. Prüfung von Holz. Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 52186, 1978	DIN 52186:1978-06. Prüfung von Holz. Biegeversuch. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 52188, 1979	DIN 52188:1979-05. Prüfung von Holz. Bestimmung der Zugfestigkeit parallel zur Faser. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68140, 1960	DIN 68140:1960-06. Holzverbindungen - Keilzinkenverbindungen als Längsverbinding. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68140, 1971	DIN 68140:1971-04. Keilzinkenverbinding von Holz. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 68364, 2003	DIN 68364:2003-05. Kennwerte von Holzarten - Rohdichte, Elastizitätsmodul und Festigkeiten. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68800, 2011, Teil 1	DIN 68800-1:2011-10. Holzschutz - Teil 1: Allgemeines. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68800, 2012, Teil 2	DIN 68800-2:2012-02. Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68800, 2012, Teil 3	DIN 68800-2:2012-02. Holzschutz - Teil 3: Vorbeugender Schutz von Holz mit Holzschutzmitteln. Berlin: Beuth Verlag.
DIN 68800, 2012, Teil 4	DIN 68800-2:2012-02. Holzschutz - Teil 4: Bekämpfungs- und Sanierungsmaßnahmen gegen Holz zerstörende Pilze und Insekten. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 301, 2013	DIN EN 301:2013-12. Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile – Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 301, 2018	DIN EN 301:2018-01. Klebstoffe, Phenoplaste und Aminoplaste, für tragende Holzbauteile - Klassifizierung und Leistungsanforderungen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 338, 2016	DIN EN 338:2016-07. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 383, 2007	DIN EN 383: 2007-03. Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit und Bettungswerte für stiftförmige Verbindungsmittel. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 387, 2002	DIN EN 387:2002-04. Brettschichtholz. Universal-Keilzinkenverbindungen. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 409, 2009	DIN EN 409: 2009-08. Holzbauwerke – Prüfverfahren – Bestimmung des Fließmoments von stiftförmigen Verbindungsmitteln. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 408, 2012	DIN EN 408:2012-10 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 1058, 2010	DIN EN 1058:2010-04. Holzwerkstoffe - Bestimmung der charakteristischen 5- %-Quantilwerte und der charakteristischen Mittelwerte. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 1995-1, 2010	DIN EN 1995-1-1:2010-12. Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN 1995-1-1/NA, 2013	DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Berlin: Beuth Verlag.

DIN EN 15497, 2014	DIN EN 15497:2014-07. Keilgezinktes Vollholz für tragende Zwecke - Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN ISO 683, 2019	DIN EN ISO 683-3:2019-04. Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle – Teil 3: Einsatzstähle. Berlin: Beuth Verlag.
DIN EN ISO 7089, 2000	DIN EN ISO 7089:2000-11. Flache Scheiben. Normale Reihe, Produktklasse. Berlin: Beuth Verlag.
DIN ISO 7093-1, 2000	DIN ISO 7093-1:2000-11. Flache Scheiben. Große Reihe. Teil 1: Produktklasse A.
EN 13501-1, 2017	DIN EN 13501-1:2017-08. Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten. Berlin: Beuth Verlag.
EN 350-2, 1994	EN 350-2: Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz – Teil 2: Leitfaden für die natürliche Dauerhaftigkeit und Tränkbarkeit von ausgewählten Holzarten von besonderer Bedeutung in Europa. Berlin: Beuth Verlag.
EN 385, 2007	EN 385:2007-11. Keilzinkenverbindungen im Bauholz – Leistungsanforderungen an die Herstellung. Berlin: Beuth Verlag.
VDI 2230, 2015	VDI 2230: 2015-11. Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Zylindrische Einschraubverbindungen. Blatt 1. Berlin: Beuth Verlag.

8.4 Zulassungsbescheide

Z-9.1-208, 1988	Deutsches Institut für Bautechnik (1988). Zulassung Z-9.1-208: BSB-Verbindung von Brettschichtholz mit innenliegenden Stahlblechen durch Stahlstifte. Antragsteller: BSB Holzkonstruktionen AG. Ausstellungsdatum 25.02.1988 - (abgelaufen)
Z-9.1-166, 2007	Deutsches Institut für Bautechnik (2007). Zulassungsbescheid Z-9.1-166: Nagelverbindung System "Greim". Antragsteller: MiTek Industries GmbH. Ausstellungsdatum 02.02.2007 – (abgelaufen)
Z-9.1-212, 1990	Deutsches Institut für Bautechnik (1990). Zulassungsbescheid Z-9.1-212: Stahlblech-Holz-Nagelverbindung mit Stahlblechdicken von 2,0 mm bis 3,0 mm ohne Vorbohren. Antragsteller: PASLODE GmbH. Ausstellungsdatum 18.04.1990 – (abgelaufen)
Z-9.1-193, 2004	Deutsches Institut für Bautechnik (2004). Zulassungsbescheid Z-9.1-193: Multi-Krallen-Dübel (MKD) als Holzverbindungsmittel. Antragsteller: Finnforest Merk GmbH. Ausstellungsdatum: 06.05.2004 – (abgelaufen)

Z-9.1-791, 2016

Deutsches Institut für Bautechnik (2016). Zulassungsbescheid Z-9.1-791: Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Gewindestangen für den Holzbau. Antragsteller Studiengemeinschaft Holzleimbau e. V. Ausstellungsdatum 16.06.2016

8.5 Quellen von Bildern aus dem Internet

Heco, 2019

Abgerufen 19. März, 2019, von: https://www.heco-schrauben.de/fileadmin/user_upload/DE/Schrauben-Zubehoer/Schrauben/HECO-WS/HECO-WS_Header_1.jpg

Flickr, 2018

Abgerufen 8. August, 2018, von: <https://www.flickr.com/photos/fwnetz/460324219/in/album-72157600079957428/>

Besista, 2018

Abgerufen 10. August 2018, von: <http://besista.com/wp-content/gallery/bildergalerie/537-Anschlussblech-Stabanker-Zugstab-System-BESISTA.jpg>

GSA, 2019

Abgerufen 17. Mai, 2018, von: https://neueholzbau.ch/wp-content/uploads/2018/07/GSA_LMV-5.jpg

Proholz, 2019

Abgerufen 10. August 2018, von: <http://www.proholz.at/typo3temp/pics/7deb98af49.jpg>

Anhang

1 Tabellen

Tabelle 28: ks-Wert bei unbekanntem Variationskoeffizient

Prüfwert	Ks-Wert	Prüfwert	Ks-Wert
2	5,122	17	1,963
3	3,152	18	1,952
4	2,681	19	1,941
5	2,463	20	1,932
6	2,336	21	1,923
7	2,25	22	1,915
8	2,188	23	1,908
9	2,141	24	1,901
10	2,104	25	1,895
11	2,073	26	1,889
12	2,048	27	1,883
13	2,026	28	1,878
14	2,007	29	1,873
15	1,991	30	1,869
16	1,976	31	1,864
		32	1,86

Tabelle 29: Knickbeiwert k_c als Funktion der Schlankheit λ für die Festigkeitsklasse C24

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	0,99854	0,99475
20	0,99089	0,98696	0,98295	0,97886	0,97466	0,97036	0,96595	0,96140	0,95672	0,95190
30	0,94691	0,94175	0,93641	0,93087	0,92512	0,91914	0,91292	0,90645	0,89970	0,89268
40	0,88535	0,87772	0,86976	0,86147	0,85283	0,84384	0,83450	0,82481	0,81476	0,80436
50	0,79363	0,78258	0,77123	0,75959	0,74771	0,73560	0,72331	0,71085	0,69828	0,68563
60	0,67293	0,66022	0,64752	0,63488	0,62233	0,60987	0,59755	0,58539	0,57339	0,56158
70	0,54997	0,53856	0,52738	0,51642	0,50570	0,49520	0,48495	0,47492	0,46514	0,45559
80	0,44627	0,43719	0,42833	0,41969	0,41128	0,40308	0,39509	0,38731	0,37972	0,37234
90	0,36515	0,35814	0,35131	0,34466	0,33819	0,33188	0,32573	0,31974	0,31390	0,30821
100	0,30267	0,29726	0,29199	0,28686	0,28185	0,27696	0,27220	0,26755	0,26301	0,25859
110	0,25427	0,25005	0,24594	0,24192	0,23800	0,23417	0,23043	0,22677	0,22320	0,21971
120	0,21630	0,21297	0,20971	0,20652	0,20341	0,20036	0,19738	0,19446	0,19161	0,18882
130	0,18608	0,18341	0,18079	0,17823	0,17572	0,17326	0,17085	0,16849	0,16618	0,16392
140	0,16170	0,15953	0,15740	0,15531	0,15326	0,15125	0,14928	0,14735	0,14545	0,14359
150	0,14177	0,13998	0,13822	0,13650	0,13480	0,13314	0,13151	0,12991	0,12834	0,12679
160	0,12528	0,12379	0,12232	0,12089	0,11947	0,11808	0,11672	0,11538	0,11406	0,11276
170	0,11149	0,11024	0,10900	0,10779	0,10660	0,10543	0,10428	0,10314	0,10203	0,10093
180	0,09985	0,09878	0,09774	0,09671	0,09569	0,09470	0,09371	0,09275	0,09179	0,09085
190	0,08993	0,08902	0,08813	0,08724	0,08637	0,08552	0,08467	0,08384	0,08302	0,08221
200	0,08142	0,08063	0,07986	0,07910	0,07835	0,07761	0,07688	0,07616	0,07545	0,07475
210	0,07406	0,07337	0,07270	0,07204	0,07139	0,07074	0,07011	0,06948	0,06886	0,06825
220	0,06765	0,06705	0,06647	0,06589	0,06531	0,06475	0,06419	0,06364	0,06310	0,06256
230	0,06203	0,06151	0,06100	0,06049	0,05998	0,05949	0,05899	0,05851	0,05803	0,05756
240	0,05709	0,05663	0,05617	0,05572	0,05528	0,05484	0,05440	0,05397	0,05355	0,05313
250	0,05272									

Tabelle 30: Übersicht der Materialparameter (Mittelwerte) für Simulationsstudien

Angabe in Mittelwerten	Parameter	Einheit	Fichte	~ C24	KP	BE 335-1
	Dichte	kg/m ³	460	DIN 68364:2003, S. 2	1.350	(4)
Verformung infolge hygroskopischer Beanspruchung	Maximales Volumenquellen	%	14	(2)	15,4	(2)
	Quellen L bei 1% u - Änderung	%	-	-	0,040	(2)
	Quellen T bei 1% u - Änderung	%	0,36	Halász & Scher, 1996 ⁽¹⁾		
	Quellen R bei 1% u - Änderung	%	0,19	Halász & Scher, 1996 ⁽¹⁾	0,67	(2)
	max Quellen L	%	0,2 ... 0,4	Halász & Scher, 1996 ⁽¹⁾	0,5 ... 0,9	(2)
	max Quellen T	%	3,7	Halász & Scher, 1996 ⁽¹⁾		
	max Quellen R	%	8,5	Halász & Scher, 1996 ⁽¹⁾	6,3 ... 13,5	(2)
Verformung infolge mechanischer Beanspruchung	Emodul X-Richtung = L	N/mm ²	11000	DIN 68364:2003, S. 2	18000	(4)
	Emodul Y-Richtung = R	N/mm ²	629	Niemz, 2011, S.33	12000	(3)
	Emodul Z-Richtung = T	N/mm ²	370	DIN EN 338:2016, S. 7	900	(4)
	Querkontraktionszahl XY = LR		0,6	Neuhaus, 1994, S. 38	0,22	(4)
	Querkontraktionszahl YZ = RT		0,027	Neuhaus, 1994, S. 38	0,19	(4)
	Querkontraktionszahl XZ = LT		0,033	Neuhaus, 1994, S. 38	0,15	(4)
	Schubmodul XY = LT	N/mm ²	690	DIN EN 338:2016, S. 7	1100	(4)
	Schubmodul YZ = RT	N/mm ²	69	Neuhaus, 1994, S. 38	1200	(4)
	Schubmodul XZ = LR	N/mm ²	690	Neuhaus, 1994, S. 38	1200	(4)

(1)	zitiert in Niemz & Sonderegger, 2017, S. 101
(2)	Kennwerte, die im Rahmen dieser Arbeit ermittelt wurden
(3)	Keine Herstellerangabe verfügbar. Annahme
(4)	Herstellerangabe für Material BE 335-1

Tabelle 31: Übersicht der Materialparameter für statische Nachweise

		Nadelholz der Festigkeitsklasse					KP	
	[N/mm ²]	C 16	C 24	C 30	C 35		BE 335-1 ⁽²⁾	BE 335-1 ⁽⁵⁾
Biegung	$f_{m,k}$ ⁽¹⁾	16	24	30	35	$f_{=,k}$ (67)	208,7	-
Zug	$f_{t,0,k}$ ⁽¹⁾	10	14	18	21	$f_{=,k}$ (67)	146,8	107,2
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	-
Druck	$f_{c,0,k}$	17	21	23	25	$f_{\perp,k}$	230	-
	$f_{c,90,k}$	2,2	2,5	2,7	2,8	$f_{=,k}$	201,9	187
Schub + Torsion	$f_{v,k}$	3,2	4,0	4,0	4,0	-	-	-
	k_{cr}	0,625	0,5	0,5	0,5			
	$E_{0,mean}$ ⁽³⁾	8.000	11.000	12.000	13.000	$E_{=,k}$ (67)	20.987	17.275
	$E_{90,mean}$ ⁽³⁾	270	370	400	430	-	-	-
	G_{mean} ⁽³⁾	500	690	750	810	-	-	-
	[kg/m ³]							
Rohdichte	ρ_k	310	350	380	400		1.350 ⁽⁴⁾	
(1)	Bei Bauteilen, die auf Zug oder Biegung beansprucht werden und deren größte Querschnittsabmessung $h \leq 150$ mm beträgt, darf $f_{m,k}$ und $f_{t,0,k}$ mit dem Faktor k_h erhöht werden: $k_h = (150/h)^{0,2} \leq 1,3$							
h	[mm]	100	110	120	130	140	≥ 150	
k_h		1,08	1,06	1,05	1,03	1,01	1	
(2)	BE 335-1 mit 67% Längs- und 33% Querlagen, auf Basis von Datenmaterial der Vorversuche an Kleinproben durch die Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG							
(3)	Für Nadelholz ist: $E_{0,05} = 2/3 \cdot E_{0,mean}$ $E_{90,05} = 2/3 \cdot E_{90,mean}$ $G_{05} = 2/3 \cdot G_{mean}$							
(4)	Herstellerangabe als Mittelwert							
(5)	eigens ermittelte Parameter an BE 335-1 mit 67% Längs- und 33% Querlagen							
	$f_{\perp,k}$	Belastung quer der Furniere		$f_{=,k}$	Belastung in Furnierrichtung			

Tabelle 32: Ergebnisse aus den Lochleibungsversuchen von $d = 8 \text{ mm}$ bis $d = 40 \text{ mm}$

d [mm]	Dehonit	a3	Prüfkörper	$f_{h,*} [\text{N/mm}^2]$	$f_{vg,*} [\text{N/mm}^2]$	bezogene Lochleibungsfestigkeit		Vergleichsfestigkeit	
						$f_{h,*\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{h,*k} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vg,\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vg,k} [\text{N/mm}^2]$
8	BE 335-1 50%L/50%Q	2,5d	1	112,6	37,5	103,6	85,9	34,5	28,6
			2	95,9	32,0				
			3	95,9	32,0				
			4	110,1	36,7				
			5	103,4	34,5				
8*	BE 335-1 50%L/50%Q	2,5d	1	105,2	35,1	101,3	82,6	33,8	27,5
			2	90,6	30,2				
			3	107,7	35,9				
			4	112,6	37,5				
			5	98,4	32,8				
			6	93,0	31,0				
8*	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	130,1	43,4	130,1	117,4	43,4	39,1
			2	127,3	42,4				
			3	126,5	42,2				
			4	124,7	41,6				
			5	140,9	47,0				
			6	131,1	43,7				
10	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	127,4	42,5	123,8	107,2	41,3	35,7
			2	111,8	37,3				
			3	118,0	39,3				
			4	126,8	42,3				
			5	127,3	42,4				
			6	131,6	43,9				
20	BE 335-1 67%L/33%Q	1,5d	1	92,9	31,0	94,4	85,8	31,5	28,6
			2	91,7	30,6				
			3	100,5	33,5				
			4	95,5	31,8				
			5	91,5	30,5				
20	BE 335-1 67%L/33%Q	2,0d	1	131,9	44,0	126,9	117,0	42,3	39,0
			2	129,3	43,1				
			3	126,2	42,1				
			4	120,8	40,3				
			5	126,5	42,2				
20	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	139,7	46,6	148,8	126,2	49,6	42,1
			2	146,3	48,8				
			3	160,1	53,4				
			4	136,9	45,6				
			5	147,6	49,2				
			6	162,4	54,1				
30	BE 335-1 67%L/33%Q	1,5d	1	97,8	32,6	91,7	68,6	30,6	22,9
			2	100,9	33,6				
			3	80,6	26,9				
			4	97,3	32,4				
			5	74,9	25,0				
			6	86,0	28,7				
			7	104,7	34,9				
30	BE 335-1 67%L/33%Q	2,0d	1	122,5	40,8	119,3	108,6	39,8	36,2
			2	113,7	37,9				
			3	127,3	42,4				
			4	118,2	39,4				
			5	117,6	39,2				
			6	116,6	38,9				
30	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	140,8	46,9	146,3	128,3	48,8	42,8
			2	139,8	46,6				
			3	148,0	49,3				
			4	142,8	47,6				
			5	162,5	54,2				
			6	143,8	47,9				
40	BE 335-1 67%L/33%Q	1,5d	1	77,6	25,9	75,1	71,1	25,0	23,7
			2	73,2	24,4				
			3	73,0	24,3				
			4	75,0	25,0				
			5	76,1	25,4				
			6	75,6	25,2				
40	BE 335-1 67%L/33%Q	2,0d	1	92,4	30,8	83,0	72,9	27,7	24,3
			2	79,4	26,5				
			3	78,4	26,1				
			4	80,9	27,0				
			5	84,5	28,2				
			6	84,9	28,3				
			7	80,4	26,8				
			8	80,4	26,8				
40	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	81,8	27,3	86,3	77,1	28,8	25,7
			2	80,7	26,9				
			3	91,0	30,3				
			4	89,3	29,8				
			5	83,6	27,9				
			6	90,7	30,2				
			7	87,0	29,0				
40	BE 335-1 50%L/50%Q	1,5d	1	81,8	27,3	83,9	67,2	28,0	22,4
			2	81,8	27,3				
			3	90,6	30,2				
			4	73,0	24,3				
			5	95,1	31,7				
			6	81,0	27,0				

* Zugversuch mit Gewindeschrauben

Tabelle 33: Ergebnisse aus den Lochleibungsversuchen von $d = 50 \text{ mm}$ bis $d = 60 \text{ mm}$

d [mm]	Dehonit	a3	Prüfkörper	$f_{h,*} [\text{N/mm}^2]$		bezogene Lochleibungsfestigkeit		Vergleichsfestigkeit	
						$f_{h*,\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{h*,k} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vgl,\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vgl,k} [\text{N/mm}^2]$
50	BE 335-1 67%L/33%Q	1,5d	1	88,9	29,6	88,0	75,8	29,3	25,3
			2	88,3	29,4				
			3	94,9	31,6				
			4	78,3	26,1				
			5	87,4	29,1				
			6	90,1	30,0				
60	BE 335-1 67%L/33%Q	1,5d	1	72,8	24,3	73,5	65,6	24,5	21,9
			2	76,4	25,5				
			3	77,5	25,8				
			4	67,7	22,6				
			5	76,7	25,6				
			6	72,6	24,2				
			7	70,5	23,5				
60	BE 335-1 67%L/33%Q	2,0d	1	89,4	29,8	82,5	68,8	27,5	22,9
			2	91,0	30,3				
			3	79,5	26,5				
			4	81,2	27,1				
			5	79,4	26,5				
			6	85,1	28,4				
			7	72,2	24,1				
60	BE 335-1 67%L/33%Q	2,5d	1	101,3	33,8	96,4	80,9	32,1	27,0
			2	98,3	32,8				
			3	99,4	33,1				
			4	108,1	36,0				
			5	91,1	30,4				
			6	87,2	29,1				
			7	89,6	29,9				
60	BE 335-1 50%L/50%Q	1,5d	1	72,0	24,0	82,2	69,0	27,4	23,0
			2	76,3	25,4				
			3	85,3	28,4				
			4	82,9	27,6				
			5	81,9	27,3				
			6	88,4	29,5				
			7	88,7	29,6				

Tabelle 34: Kennwerte der bezogenen Lochleibungsfestigkeit und der Vergleichsfestigkeit aus Druckversuchen

d [mm]	Prüfkörper	$f_{h,*} [\text{N/mm}^2]$	bezogene Lochleibungsfestigkeit		Vergleichsfestigkeit	
			$f_{h*,\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{h*,k} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vgl,\text{mittel}} [\text{N/mm}^2]$	$f_{t,vgl,k} [\text{N/mm}^2]$
20	1	265,3	261,8	237,8	87,3	79,3
	2	256,1				
	3	247,2				
	4	270,2				
	5	270,4				
30	1	225,1	245,8	216,1	81,9	72,0
	2	247,0				
	3	257,1				
	4	253,5				
	5	246,4				
40	1	236,3	242,8	213,4	80,9	71,1
	2	242,3				
	3	257,7				
	4	251,8				
	5	225,9				

2 Bemessung

2.1 Bemessung des Stabdübel- und des Bolzenanschlusses

Durch das Schlitzten der Stäbe reduziert sich die Querschnittsfläche um 4,2%. Durch die Anordnung der Verbindungsmittel gemäß Abbildung 12, S. 15 im Hauptteil reduziert sich der Querschnitt beim Stabdübelanschluss um 25 % und beim Passbolzenanschluss 20 %.

1) Stabdübelanschluss mit Stabdübeln der Festigkeitsklasse S335 mit d = 10 mm:

Die Tragfähigkeit des Untergurt-Zugstabes der Festigkeitsklasse C24 berechnet sich im Standardfall mit:

$$\begin{aligned}
 F_{t,0,Rd} &= A_{netto} \times f_{t,0,d} \times k_h \\
 &= 1 - \left(\frac{25\%}{1 - 4,2\%} \right) \times (120 \text{ mm})^2 \times 8,615 \text{ N/mm}^2 \times 1,046 \\
 &= \mathbf{95,89 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

A_{netto} Nettoquerschnittsfläche k_h Höhenfaktor

$f_{t,0,d}$ Bemessungswert der Zugfestigkeit = $f_{t,0,k} \times \lambda_M / k_{mod}$

Berechnung der charakteristischen Festigkeit pro Scherfuge nach Johansen:

Zweischnittiger Anschluss mit mittigem Stahlblech:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{aligned} & f_{h,1,k} \times t_1 \times d \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ & 2,3 \times \sqrt{M_{y,Rk} \times f_{h,1,k} \times d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{aligned} \right.$$

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{aligned} & 25,83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 57,5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} && = 14.852 \text{ N} \\ & 14,852 \text{ kN} \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times 60.910}{25,83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times (57,5 \text{ mm})^2 \times 10 \text{ mm}}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} && = \mathbf{7.600 \text{ N}} \\ & 2,3 \times \sqrt{60.910 \times 25,83 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 10 \text{ mm}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} && = 9.123 \text{ N} \end{aligned} \right.$$

$F_{v,Rk}$ charakteristischer Wert der Tragfähigkeit pro Scherfuge und Verbindungsmittel [N]

$f_{h,1,k}$ charakteristischer Wert der Lochleibungsfestigkeit im Holzteil [N/mm²]

Ermittlung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01 \times d) \times p_k$$

$$f_{h,k} = 0,082 (1 - 0,01 \times 10 \text{ mm}) \times 350 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{h,k} = \mathbf{25,83 \text{ N/mm}^2}$$

t_1 Seitenholzdicke in [mm]

d Durchmesser des Verbindungsmittels

$M_{y,Rk}$ charakteristischer Wert des Fließmomentes des Verbindungsmittels

$F_{ax,Rk}$ charakteristischer Wert des Ausziehwiderstandes des Verbindungsmittels,

für Stabdübel max $0 \times F_{v,Rk}$ für Bolzen max 25 % $F_{v,Rk}$

Ermittlung des charakteristischen Fließmomentes

$$M_{y,Rk} = 0,3 f_{u,k} \times d^{2,6}$$

$$= 0,3 \times 510 \times (10 \text{ mm})^{2,6}$$

$$= \mathbf{60.910 \text{ N}}$$

$f_{u,k}$ charakteristischer Wert der Zugfestigkeit für Stabdübel S355 = 510 N/mm²

Berechnung der Design-Festigkeit pro Scherfuge

$$F_{v,Rd} = F_{v,Rk} \times \frac{k_{mod}}{\lambda_M}$$

$$= 7.600 \text{ N} \times \frac{0,8}{1,3}$$

$$= \mathbf{4.677 \text{ N}}$$

$$\lambda_M = 1,3$$

Teilsicherheitsbeiwert für Verbindungsmittel nach DIN EN 1995-1/NA, 2013

Mit:
$$\frac{F_{t,0,d}}{F_{v,Rd}} = \frac{95,89 \text{ kN}}{4,677 \text{ kN}} = 20,5$$

sind demnach mindestens 11 Stabdübel erforderlich.

Einfluss hintereinander angeordneter Verbindungsmittel:

Wahl 5 Reihen à 3 Stabdübel mit $d = 10 \text{ mm}$, $a_3 = 80 \text{ mm}$, $a_2 = 50 \text{ mm}$:

$$F_{v,Rd,ef} = k_{ef} \times n_{VM} \times n_{\frac{SF}{VM}} \times F_{v,Rd}$$
$$= 0,67 \times 15 \times 2 \times 4.677 \text{ N}$$

$$= 94,0 \text{ kN} < 95,89 \text{ kN} = F_{t,0,Rd} \quad (\text{Überschreitung um 2\%, ok})$$

n_{VM} Anzahl der Verbindungsmittel

$n_{SF/VM}$

Anzahl der Scherfugen pro Verbindungsmittel

k_{ef} Spaltfaktor

$$k_{ef} = \frac{n_h^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \times d}}}{n_h} \leq 1$$

a_1 Abstand der Verbindungsmittel hintereinander
hier = 50 mm

n_h Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander
hier = 5

2) Passbolzenanschluss mit Passbolzen d = 12 mm; 8.8

Die Tragfähigkeit des Untergurt-Zugstabes berechnet sich mit:

$$\begin{aligned} F_{t,0,Rd} &= A_{netto} \times f_{t,0,d} \times k_h \\ &= 1 - \left(\frac{20\%}{1 - 4,2\%} \right) \times (120 \text{ mm})^2 \times 8,615 \text{ N/mm}^2 \times 1,046 \\ &= 102,67 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berechnung der charakteristischen Festigkeit pro Scherfuge:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{ll} 25,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 57,5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} & = 17.429 \text{ N} \\ 17.429 \text{ N} \times \left[\sqrt{2 + \frac{4 \times 153.491 \text{ N}}{25,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times (57,5 \text{ mm})^2 \times 12 \text{ mm}}} - 1 \right] \times 1,25 & = 13.428 \text{ N} \\ 2,3 \times \sqrt{153.491 \times 25,26 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times 12 \text{ mm} \times 1,25} & = 19.610 \text{ N} \end{array} \right.$$

Ermittlung des charakteristischen Auszieh Widerstandes

$$\begin{aligned} F_{ax,Rk} &= k_{c,90} \times f_{c,90,k} \times A_{ef} \\ &= 1,0 \times 2,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \times \left(48 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} - (13,5 \text{ mm})^2 \times \frac{\pi}{4} \right) \\ &= 49.221 \text{ N} \end{aligned}$$

Der Anteil $\frac{F_{ax,Rk}}{4}$ muss auf 25 % $F_{v,Rk}$ begrenzt werden!

$k_{c,90}$ Beiwert für Querdruckflächen; 1,0 bei Anschlüssen mit mehreren Bolzen nebeneinander

$f_{c,90,k}$ charakteristische Druckfestigkeit des Holzes senkrecht zur Faser

A_{ef} wirksame Querdruckfläche zwischen Unterlegscheibe und Holzoberfläche mit $A_{ef} = a_1 \times d_a - d_t^2 \times \frac{\pi}{4}$

$a_1 = 4 \times d$; für 12 mm Passbolzen ist $d_a = 44 \text{ mm}$ und $d_t = 13,5 \text{ mm}$

Ermittlung des charakteristischen Fließmomentes

$$\begin{aligned} M_{y,Rk} &= 0,3 \times 800 \times (12 \text{ mm})^{2,6} \\ &= \mathbf{153.491 \text{ N}} \end{aligned}$$

Ermittlung der charakteristischen Lochleibungsfestigkeit

$$\begin{aligned} f_{h,k} &= 0,082 (1 - 0,01 \times d) \times p_k \\ f_{h,k} &= 0,082 (1 - 0,01 \times 12 \text{ mm}) \times 350 \text{ kg/m}^3 \\ \mathbf{f_{h,k} &= 25,26 \text{ N/mm}^2} \end{aligned}$$

Berechnung der Design-Festigkeit pro Scherfuge

$$\begin{aligned} F_{v,Rd} &= F_{v,Rk} \times \frac{k_{mod}}{\lambda_M} \\ &= 13.428 \text{ N} \times \frac{0,8}{1,3} \\ &= 8.263 \text{ N} \end{aligned}$$

Mit

$$\frac{F_{t,0,d}}{F_{v,Rk}} = \frac{102,67 \text{ kN}}{8,263 \text{ kN}} = \mathbf{12,4}$$

sind demnach mindestens 7 Passbolzen zu verwenden.

Einfluss hintereinander angeordneter Verbindungsmittel:

Wahl 5 Reihen à 2 Passbolzen mit $d = 12 \text{ mm}$, $a_3 = 84 \text{ mm}$, $a_2 = 60 \text{ mm}$:

$$\begin{aligned} F_{v,Rd,ef} &= k_{ef} \times n_{VM} \times n_{\frac{SF}{VM}} \times F_{v,Rd} \\ &= 0,670 \times 10 \times 2 \times 8.263 \text{ N} \\ &= \mathbf{110,72 \text{ kN} > 102,67 \text{ kN} = F_{t,0,Rd} (\checkmark)} \end{aligned}$$

n_{VM} Anzahl der Verbindungsmittel

$n_{SF/VM}$

Anzahl der Scherfugen pro Verbindungsmittel

k_{ef} Spaltfaktor

$$k_{ef} = \frac{n_h^{0,9} \times \sqrt[4]{\frac{a_1}{13 \times d}}}{n_h} \leq 1$$

a_1 Abstand der Verbindungsmittel hintereinander
hier = 60 mm

n_h

Anzahl der Verbindungsmittel hintereinander
hier = 5

3 Dokumentation der Prüfreiheiten

Die Prüfreiheiten wurden im Rahmen der nachfolgend aufgeführten Arbeiten durchgeführt. Auf die jeweilige Arbeit wird im entsprechenden Prüfprotokoll der Prüfreiheit verwiesen.

Abk. [Deho; Forschungsprojekt Deho]

Forschungsprojekt: Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken – ZIM Projekt (Förderkennzeichen KF3423101AT4)

Abk. [HBV-Brücke]

Forschungsprojekt: Entwicklung neuartiger Holz-Beton-Verbundbrücken aus Laub-Brettschichtholz und Faserbeton – ZIM Projekt (Förderkennzeichen KF2268004AT4)

Abk. [Zukunft Bau: acetylierte Buche]

Forschungsprojekt: Neue Potentiale im konstruktiven Holzbau durch acetylierte Buche (Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-16.13)

Abk. [Technologie des Holzes]

Lehrveranstaltung: *Technologie des Holzes* im Wintersemester 2017/2018 am Fachbereich Architektur der TU Kaiserslautern, unter der Seminarleitung von Dipl.-Ing. Dennis Röver und Dipl.-Ing. FH Reiner Klopfer.

Abk. [Dissertation Röver]

Weiterführende Versuchsreihen im Rahmen der Dissertation ohne Projekt- oder Lehrbezug

3.1 Versuche zum hygroskopischen Verhalten

3.1.1 Geschwindigkeit der Auffeuchtung und Trocknung von Fichtenholz und KP

Es wurden Untersuchungen zum Trocknungsverhalten und zum Auffeuchteverhalten von KP, Fichte und Buche an Prüfquadern der Abmessung 20 mm x 20 mm x 40 mm durchgeführt. Zur Massendokumentation wurde eine Feinwaage des Typs Kern CM 60-2N verwendet. Die Massen wurden auf 0,01 g genau bestimmt. Weiterhin wurden die Querschnittsabmessungen mit einem digitalen Messschieber festgehalten. Daraus wurde die Querschnittsveränderung infolge Quellung als Volumenquellung und als Achsenquellung ermittelt.

Die KP-Prüfkörper wurden aus Dehonit BE335-1 von der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH und Co. KG hergestellt. Es handelt sich dabei um ein vollständig imprägniertes KP mit auf ca. 0,8 mm verdichteten Einzelfurnieren. Dabei wurden verschiedenen Furnierschichtungen (67 % L / 33 % Q; 50 % L / 50 % Q und 33 % L / 67 % Q) vorgenommen. Die Prüfkörper mit 67 % L / 33 % Q und 33 % L / 67 % Q wurden aus ein und derselben Platte gewonnen. Der unterschiedliche Anteil aus Längs- und Querlagen wurde dadurch erreicht, dass die Prüfquader einmal horizontal und einmal vertikal aus der Platte herausgeschnitten wurden. Die Prüfkörper mit einem Anteil von 50 % Längslagen und 50 % Querlagen wurden aus einer separaten Platte herausgetrennt.

Es fiel im Vorfeld auf, dass die Prüfquader unterschiedliche Rotfärbungen aufwiesen, während die Prüfquader aus KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q gleiche Rotfärbungen wie die Prüfquader aus KP BE 335-1 33 % L / 67 % Q aufwiesen, waren die Prüfquader aus BE 335-1 50 % L / 50 % Q merklich heller, was ein möglicher Hinweis auf eine geringere Menge an Phenolharz darstellt (vgl. Abbildung 212).



Abbildung 212: Unterschiedliche Rotfärbungen der Prüfquader, links KP BE 335-1 67/33, mittig KP BE 335-1 50/50, rechts KP BE 335-1 33/67

Neben den Prüfkörpern aus KP wurden Referenzprüfkörper aus Fichte ($\rho_{\text{mittel}} = 363 \text{ kg/m}^3$) und aus Buche ($\rho_{\text{mittel}} = 818 \text{ kg/m}^3$) hergestellt.

Alle KP-Prüfkörper befanden sich zunächst für ca. 1 Jahr in einem beheizten Kellerraum der TU Kaiserslautern. Klimalogger dokumentierten eine durchschnittliche Luftfeuchte von 42 % und eine durchschnittliche Temperatur von 18 °C am Lagerort. Die Prüfkörper der nativen Hölzer wurden für wenige Tage im selben Kellerraum gelagert, bevor alle Prüfkörper für 8 Tage im Trockenschrank gelagert wurden.

Trocknung

Die Holz Trocknung erfolgte im Trockenschrank bei 103 °C. An den Prüfkörpern wurden in regelmäßigen Zeitabständen der Masseverlust dokumentiert. Während die Prüfkörper aus nativem Holz bereits nach

wenigen Stunden den darrtrockenen Zustand erreichten, dauerte die Trocknung der KP-Querschnitte erheblich länger. Dabei zeigte sich, dass die KP - Prüfkörper mit einer Schichtorientierung von 50 % L / 50 % Q deutlich schneller an Masse verloren als die Prüfkörper mit einer Furnierorientierung von 67 % L / 33 % Q und 33 % L / 67 % Q, was sich unter der Annahme gleicher Herstellungsbedingungen, gleicher Tränkungsgrade und gleicher Ausgangsfurniere holzanatomisch nicht erklären lässt. Aufgrund der unterschiedlichen Rot - Färbungen der Prüfquader (vgl. Abbildung 212) und der damit aufgestellten These eines geringen Phenolharzanteils der blasseren Prüfkörper, liegt ein möglicher Erklärungsansatz innerhalb der Zellwand. Hohe Phenolharzanteile unterbinden die Wasserleitung innerhalb der Zellwand stärker als geringere Phenolharzanteile.

Die nach 8 Tagen erreichte Masse wurde als *Darrmasse* definiert.

In weiteren Untersuchungen wurden KP - Prüfkörper über mehrere Wochen getrocknet, um den Zeitraum zum Erreichen des darrtrockenen Zustands genauer zu dokumentieren (s. Abbildung 214). Mit 4,8 % Masseverlust wurde der darrtrockene Zustand nach etwa 1000 Stunden erreicht. Die für die Prüfkörper aus KP zugrunde gelegten Darrmassen weichen demnach geringfügig (ca. 1 %) von der tatsächlichen Darrmasse ab.

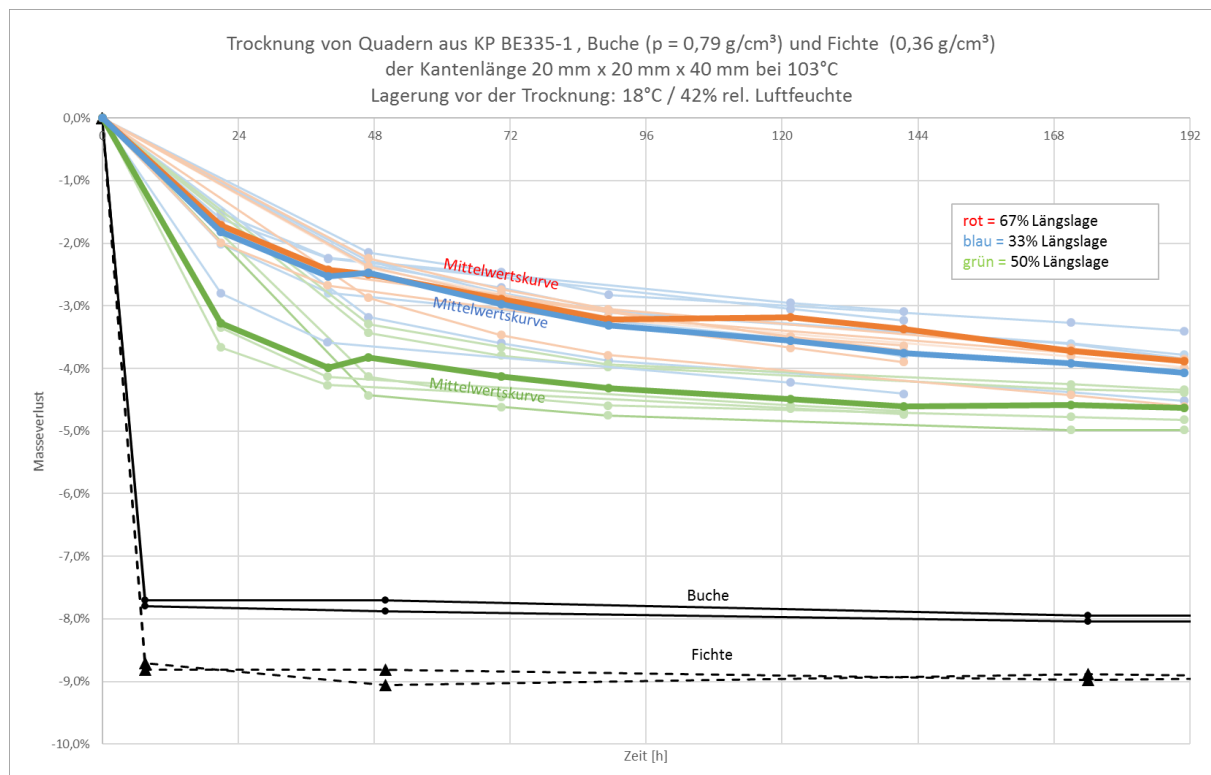


Abbildung 213: Trocknung von KP BE335-1, Buche, und Fichte über 8 Tage

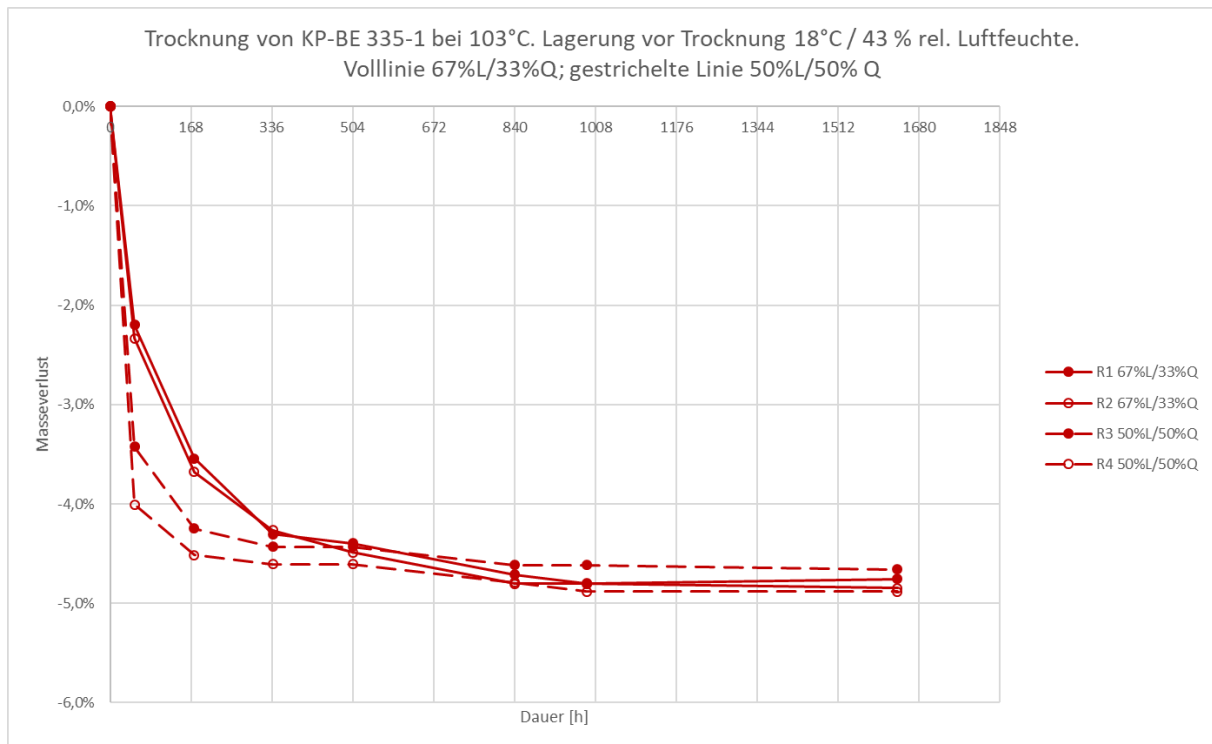


Abbildung 214: Trocknung von KP zur Ermittlung der Trocknungsdauer bis zum darrtrockenen Zustand

Auffeuchtung - Lagerungsdauer und Holzfeuchte

Nach der Trocknung wurden die Prüfkörper aufgeteilt und einer Lagerung - wie nachfolgend beschrieben - unterzogen:

Variante 1, [n = 10]: Lagerung der Prüfkörper vollständig unter Wasser, bei einer Wassertemperatur von 19 °C. Die Auffeuchtung erfolgte über alle 6 Seiten der Prüfquader (vgl. Abbildung 215). Dokumentiert wurden die Gewichtszunahme und das Quellverhalten über 7.414 Stunden (309 Tage).



Abbildung 215: Kollektiv der Prüfkörper das im Wasserbad gelagert wurde

Tabelle 35: Prüfkörper für die Lagerung im Wasserbad, Variante 1

BE335-1 67 %L 1	BE335-1 50 %L 1	BE335-1 33 %L 1	Fichte - 1	Buche - 1
BE335-1 67 %L 2	BE335-1 50 %L 2	BE335-1 33 %L 2	Fichte - 2	Buche - 2

Variante 2, [n = 10]: Lagerung der Prüfkörper im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, alle Seiten der Prüfkörper stehen mit der Umgebung in unmittelbarem Kontakt (vgl. Abbildung 216). Die Auffeuchtung erfolgte ebenfalls über alle 6 Seiten der Prüfquader. Dokumentiert wurde die Gewichtszunahme über 309 Tage.

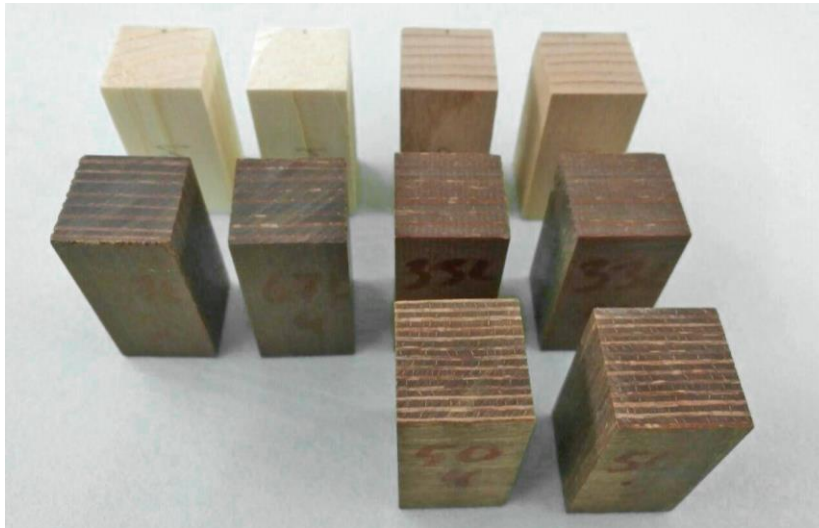


Abbildung 216: Kollektiv der Prüfkörper das im Klimaschrank gelagert wurde

Tabelle 36: Prüfkörper für die Lagerung im Klimaschrank, Variante 2

BE335-1 67 %L 3	BE335-1 50 %L 3	BE335-1 33 %L 3	Fichte - 3	Buche - 3
BE335-1 67 %L 4	BE335-1 50 %L 4	BE335-1 33 %L 4	Fichte - 4	Buche - 4

Variante 3, [n = 21]: Lagerung der Prüfkörper im Normalklima bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, nur eine Seite der Prüfkörper (40 mm x 20 mm) steht mit der Umgebung in unmittelbarem Kontakt, die übrigen 5 Seiten wurden mit einem Aluminium-Dampfsperrband beklebt (vgl. Abbildung 217). Bei KP findet eine Differenzierung in Tangentialrichtung der Furniere [T] und in Richtung der Furniere hier die Querlagen [Q] statt. Bei Buche und Fichte findet eine Differenzierung in Stirnflächen [L], Radialflächen [R], und Tangentialflächen [T] statt. Während für die Prüfkörper aus nativem Holz jeweils das Adsorptionsverhalten in Axial-, Radial, und Tangentialrichtung untersucht wurde, wurde bei KP das Adsorptionsverhalten in der Plattenebene und quer zur Plattenebene dokumentiert. Die Gewichtszunahme wurde über 309 Tage festgehalten.

Tabelle 37: Prüfkörper für die Lagerung im Klimaschrank, Variante 3

BE335-1 67 %L 5 [Q]	BE335-1 50 %L 5 [Q]	BE335-1 33 %L 5 [Q]	Buche – A1 [L]	Fichte – A1 [L]
BE335-1 67 %L 6 [Q]	BE335-1 50 %L 6 [Q]	BE335-1 33 %L 6 [Q]	Buche – A2 [L]	Fichte – A2 [L]
BE335-1 67 %L 7 [T]	BE335-1 50 %L 7 [T]	BE335-1 33 %L 7 [T]	Buche – A3 [R]	Fichte – A3 [R]
			Buche – A4 [R]	Fichte – A4 [R]
			Buche – A5 [T]	Fichte – A5 [T]
			Buche – A5 [T]	Fichte – A6 [T]

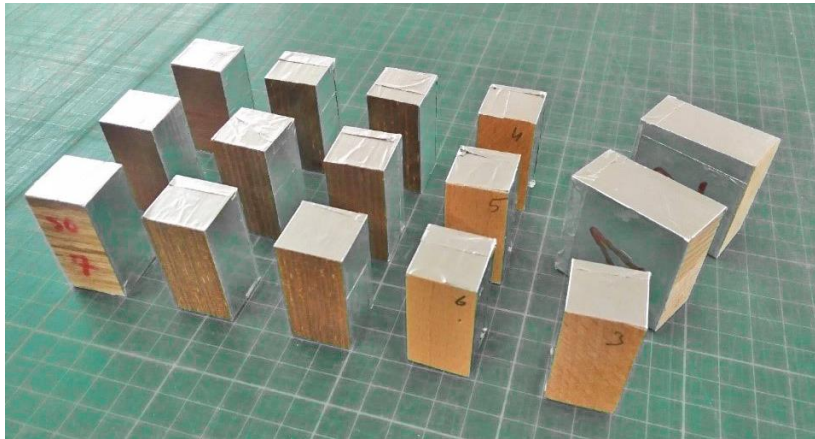


Abbildung 217: Kollektiv der Prüfquader zur Dokumentation des Auffeuchteverhaltens über eine einzelne Seite: links KP, rechtes Buche nativ. Anmerkung, die Fichtenprüfkörper sind hier nicht abgebildet

3.1.2 Dämpfung des hygroskopischen Verhaltens durch Oberflächenanstriche

An 4,0 cm x 4,0 cm x 2,2 cm starke Prüfkörper aus Fichtenholz mit einer Dichte von 0,384 g/cm³ und 0,428 g/cm³ wurden zwei verschiedene Anstriche aufgebracht:

Beim Anstrich Produkt 1 handelte es sich um das Produkt **Steinert® Drechsleröl**, einem nach DIN 68861, Teil 1 wasserbeständigen Holzschutz auf Basis pflanzlicher Öle⁶⁴. Beim Anstrich Produkt 2 handelte es sich um das Produkt **Remmers HWS 112 Hartwachs-Siegel** einer 1K- Alkydharz-Versiegelung⁶⁵.

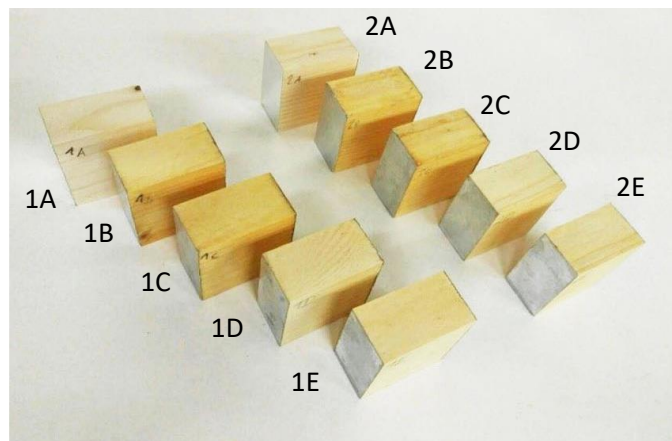
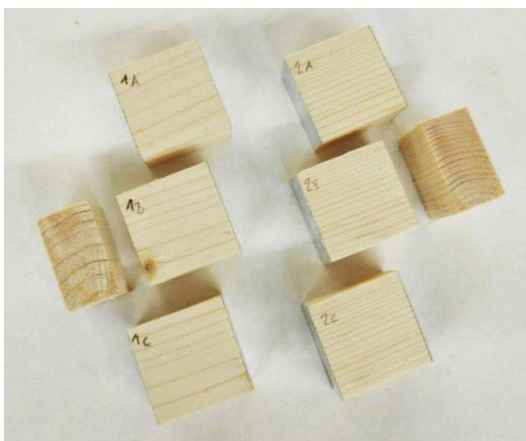


Abbildung 218: Links: Prüfkörper 1 A-C und 2 A-C vor dem Anstrich; rechts: Prüfkörper 1 A-E und 2 A-E nach dem Anstrich

Die Prüfkörper wurden aus zwei Dachlatten gewonnen, die im Vorfeld über mehrere Wochen im Normalklima gelagert worden sind, sodass sie eine über den Querschnitt konstante Holzfeuchte von ca. 12 % aufwiesen. Aus jeder Dachlatte wurden 5 Prüfquader entnommen. Die Tangential- und die Radialflächen wurden gehobelt, die Stirnholzflächen wurden gesägt und anschließend mit Aluminiumfolie abgeklebt. Der Wasseraustausch mit der umgebenden Luft konnte dadurch ausschließlich über die Radialflächen und die Tangentialflächen erfolgen. (vgl. Abbildung 218).

⁶⁴ s. Technisches Merkblatt: https://drechslershop.de/media/docs/merkblatt_oel.pdf (letzter Aufruf: 23.06.2019)

⁶⁵ s. Technisches Merkblatt: https://media.remmers.com/celum/export/documents/Remmers_1826_HWS-112-Hartwachs-Siegel_Technisches-Merkblatt_de_DE_27926.pdf (letzter Aufruf: 23.06.2019)

Prüfkörper 1A und 2A blieben als Referenzprüfkörper unbehandelt. Auf Prüfkörper 1B und 2B wurde mit einem Pinsel Anstrich 1 einmal aufgetragen. Auf Prüfkörper 1C und 2C wurden mit einem Pinsel insgesamt 3x Anstrich 1 aufgebracht. 20 Minuten nach jedem Auftrag wurde die Produktrestmenge mit einem Baumwolltuch abgewischt. Der Zweit- und Dritt-Auftrag folgte im Abstand von 24 h.

Auf Prüfkörper 1D und 2D wurde Produkt 2 einmal aufgetragen, auf Prüfkörper 1E und 2E wurde Produkt 2 zweimal aufgetragen. Der Auftrag erfolgte analog Produkt 1. Alle Prüfkörper wurden während den einzelnen Arbeitsschritten im Normalklima gelagert. Nach jedem Arbeitsschritt wurde die Masse der Prüfkörper festgehalten, um den Masseanteil der Aluminiumfolie und den des Anstriches ermitteln zu können.

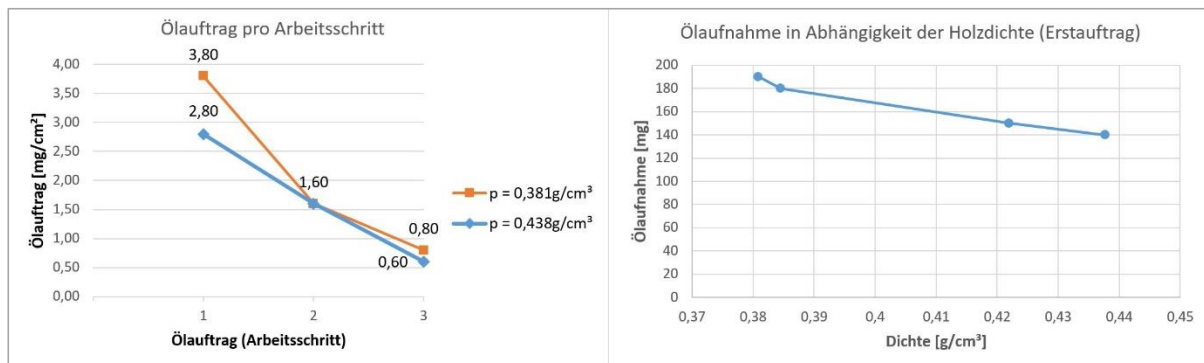


Abbildung 219: Links: Ölauftrag je Arbeitsschritt am Prüfkörper 1C und 2C, rechts: Ölaufnahme beim Erstauftrag am Prüfkörper 1B, 2B, 1C und 2 C. Produkt Steinert Drechsleröl

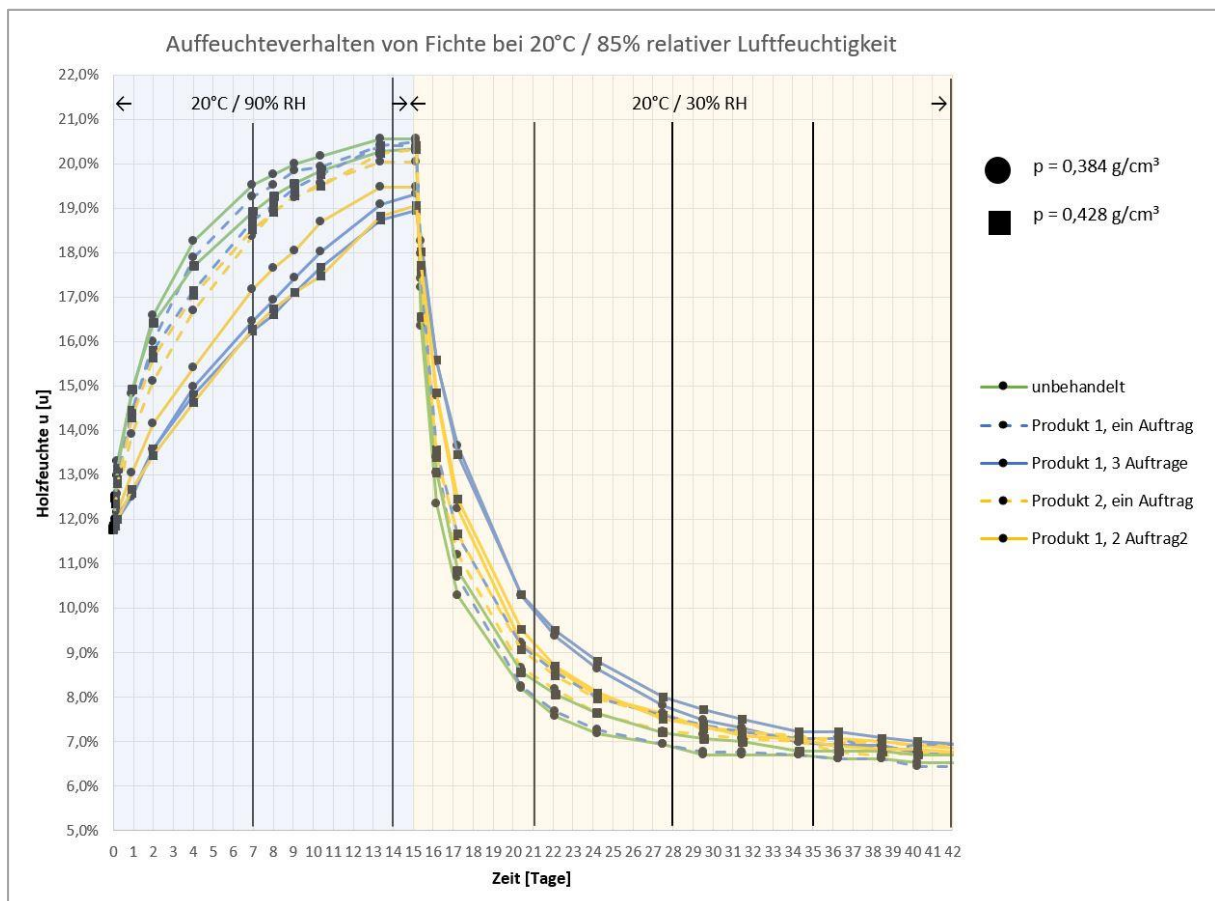


Abbildung 220: Dokumentation der Holzfeuchte als Sorptionskurven

Es zeigte sich, dass beim Erstauftrag der Anstriche die größte Produktmenge vom Holz aufgenommen wurde und mit jedem weiteren Anstrich (bis zum einschließlich dritten Anstrich) die Menge stetig abnahm (vgl. Abbildung 219, links). Des Weiteren zeigte sich, dass mit steigender Rohdichte die Aufnahmemenge beim Produkterstauftrag abnimmt (vgl. Abbildung 219, rechts). Die Aufnahmemenge beim Zweit- und Dritttauftrag war weitgehend unabhängig von der Holzdicke.

4 Tage nach dem letzten Produktauftrag wurden die Prüfkörper in einem Klima von 20 °C und 90 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die Wasseraufnahme wurde durch Wägung mittels einer Feinwaage des Typs Kern CM 60-2N dokumentiert. Nachdem die unbehandelten Prüfkörper eine Holzausgleichsfeuchte von ca. 20,5 % erreicht hatten, wurden alle Prüfkörper bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 30 % getrocknet. Die Wasserabgabe wurde ebenfalls bis zum Erreichen der Holzausgleichsfeuchte von ca. 6.5 % mittels Wägung dokumentiert (vgl. Abbildung 220).

3.1.3 Delaminationsprüfung der Keilzinkenverbindung zwischen Fichte und KP

An insgesamt 17 Prüfkörpern wurde mittels Delaminationsprüfung in Anlehnung an (DIN EN 301, 2013) die Klebeigenschaften des Klebstoffs Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 für die Verklebung von Keilzinken in einer Keilzinkenverbindung I-15 zwischen nativem Fichtenholz und KP untersucht. Die Prüfkörperabmessungen und der Herstellungsprozess der Prüfkörper können Kap. 3.2.5, S. A-22 entnommen werden.

Nach dem Aushärten der Klebfuge wurden die Prüfkörper zunächst einer 6-stündigen Lagerung in kochendem Wasser (Abbildung 221, links) und einer anschließenden einstündigen Lagerung in 20 °C kaltem Wasser (Abbildung 221, rechts) unterzogen. Im Anschluss daran wurden die Prüfkörper angetrocknet und bei einem Klima von 85 % relativer Luftfeuchtigkeit und 20 °C bis zur visuellen Prüfung gelagert. Für die Begutachtung der Klebfuge wurde ein digitales Lichtmikroskop eingesetzt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 1, S. A-45 aufgeführt.



Abbildung 221: Lagerung der Charge W4 in kochendem Wasser

3.2 Zugversuche in Anlehnung an DIN 52188 (1979) und DIN EN 408 (2012)

3.2.1 KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q

Zur Bestimmung des Zug-Elastizitätsmoduls und der Zugfestigkeit an KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Es wurden Versuche an sowohl fehlerfreiem KP (Reihe H) als auch an solchen Prüfkörper durchgeführt, die Fehlstellen aufwiesen (Reihe G, Reihe I und Reihe J). Die Prüfkörper entstammten aus zwei verschiedenen Produktionschargen. Die Prüfkörper aus Reihe G entstammten Charge 1, die Prüfkörper aus den Reihen H, I und J entstammten Charge 2.



Abbildung 222: Seitenansicht der Prüfkörper mit Fehlstellen

Tabelle 38: Übersicht zu den Versuchen

Reihe G	Reihe H	Reihe I	Reihe J
beide Schichtfehler- typen [n = 11]	fehlerfrei [n = 12]	1 Schichtfehler Typ 1 Überlappung [n = 12]	1 Schichtfehler Typ 2 Stumpfer Stoß [n = 12]
		2 Schichtfehler Typ 1 Überlappung [n = 6]	2 Schichtfehler Typ 2 Stumpfer Stoß [n = 6]

In den Versuchsreihen G, H, I und J wurde die Auswirkung dieser Schichtfehler auf die Zugfestigkeit von KP untersucht.

- Die Versuchskörper der Reihe H wiesen im Prüfbereich keine Schichtfehler auf.
- Die Prüfkörper der Reihe J waren mit Schichtfehlern in Form stumpfer Furnierstöße versehen (Abbildung 222, rechts). Es wurden sowohl die Auswirkung eines einzelnen Stoßes als auch zwei im selben Querschnittsbereich übereinander gelegener Stöße untersucht.

- Die Prüfkörper der Reihe I waren mit Schichtfehlern in Form von Furnierüberlappungen versehen (Abbildung 222, links). Es wurde sowohl die Auswirkung einer einzelnen Überlappung als auch zwei im selben Querschnittsbereich übereinander gelegener Überlappungen untersucht.
- Prüfkörper der Reihe G wiesen beide Schichtfehler auf.

Prüfung

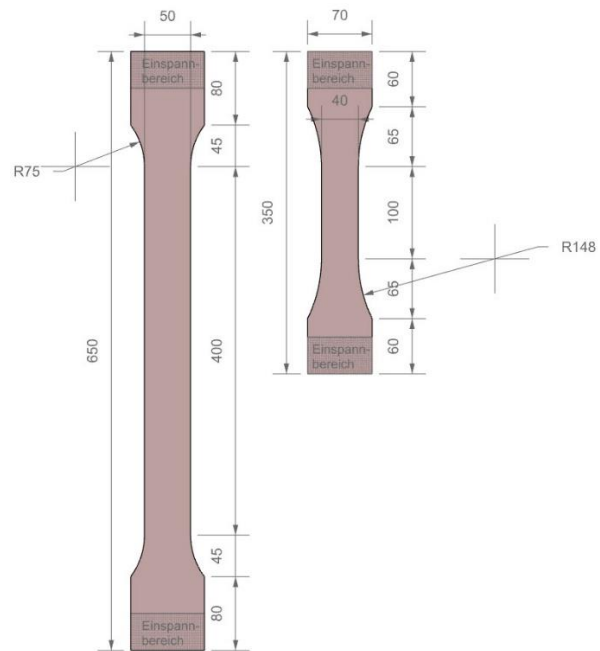


Abbildung 223: links: Versuchsaufbau der Reihen G, H, I, J. rechts: Prüfkörpergeometrie, G links, H, I, J, K rechts

Die Prüfkörper wurden im Werk der Deutschen Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG in Kirchhundem hergestellt. Die Zugprüfungen fanden bei ca. 20 °C auf einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ an der TU Kaiserslautern statt. Die Prüfkörper wurden mittels hydraulischer Einspannbacken in die Prüfmaschine eingespannt. Beim Einspannen wurde eine Zugkraft auf die Prüfkörper ausgeübt, die als Vorspannkraft in die Prüfprotokolle aufgenommen und bei der Ermittlung der Bruchspannung berücksichtigt wurde. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1,8 mm/min. In allen Versuchen wurde die Kraft als auch der Verfahrweg erfasst. In Reihe G wurde zudem der Elastizitätsmodul mit Hilfe eines Extensometers bestimmt. Es ist zu beachten, dass die Verfahrwege der Protokolle nicht untereinander verglichen werden können, da die Prüfkörpergeometrie und damit auch die Prüffeldlänge der unterschiedlichen Reihen nicht gleich war (vgl. Abbildung 223). Prüfgeschwindigkeit und Prüfdauer können den Prüfprotokollen entnommen werden. In allen Versuchen wurde die Kraft als auch der Verfahrweg mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 2, S. A-46, bis Prüfprotokoll 5, S. A-49 aufgeführt.

3.2.2 Schäftungsverbindungen zwischen nativem Nadelholz und KP

An Schäftungsverbindungen zwischen Fichte und KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q wurden Festigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Der Schäftungswinkel betrug 5,7°. Verklebt wurden die Querschnitte mit

einem PRF-Klebstoff (Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018). Die Holzfeuchte des nativen Holzes lag bei der Verklebung und der Prüfung bei ca. 12 %.

Die Zugprüfungen fanden auf einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ statt. Die Prüfkörper wurden mittels hydraulischer Einspannbacken in die Prüfmaschine eingespannt. Beim Einspannen wurde eine Zugkraft auf die Prüfkörper ausgeübt, die als Vorspannkraft in die Prüfprotokolle aufgenommen und bei der Ermittlung der Bruchspannung berücksichtigt wurde. Die Prüfungsgeschwindigkeit betrug $1,5 \text{ mm/min}$. In allen Versuchen wurde die Kraft als auch der Verfahrweg mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 6, S. A-50 aufgeführt.

3.2.3 Keilzinkenverbindungen I-20 zwischen Fichte und Fichte / Fichte und KP

Es wurden Keilzinkenfestigkeiten an Zinkenverbindungen des Typs I-20 zwischen nativer Fichte und nativer Fichte als auch zwischen nativer Fichte und KP ermittelt. Für die Verklebung kam Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 zum Einsatz. Die Prüfkörper wurden im Werk der Deutschen Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG in Kirchhundem mit einem neuen Keilzinkenfräskopf der Firma Emil Leitz GmbH hergestellt. Die mittlere Dichte der nativen Fichte lag bei ca. $0,528 \text{ g/cm}^3$. Die Holzfeuchte lag während der Produktion und der Prüfung bei ca. 12 %. Im Herstellungsprozess wurden Pressdrücke p als auch die Vorschubgeschwindigkeit v_f beim Fräsen der Keilzinkenverbindung variiert, um den Einfluss der beiden Parameter zu quantifizieren.

Es wurden zunächst Bezugsparameter definiert, diese wurden dann in 3 Stufen variiert. Als Bezugsdruck bei der Verklebung wurde der für das Vorzugsprofil I-20mm empfohlene Pressdruck nach (DIN EN 15497, 2014) mit $8,25 \text{ N/mm}^2$ festgelegt. Als Bezugsvorschubgeschwindigkeit v_f wurden $8,4 \text{ m/min}$ festgelegt, was bei einer Drehzahl z von 6000 U/min und bei $n = 2$ Schneiden, einem Vorschub pro Zahn f_z von:

$$f_z = \frac{v_f}{2 \times z} = \frac{8400 \text{ mm/min}}{2 \times 6000 \times U/\text{min}} = 0,7 \frac{\text{mm}}{U}$$

entspricht.

Tabelle 39: Prozessparameter bei der Herstellung der Prüfkörper

Bezeichnung	Partner 1	Partner 2	Pressdruck	Vorschub
B	Fichte	Fichte	100%	100%
B1	Fichte	Fichte	100%	75%
B2	Fichte	Fichte	100%	50%
B3	Fichte	Fichte	50%	100%
B4	Fichte	Fichte	150%	100%
C	Fichte	KP	100%	100%
C1	Fichte	KP	100%	75%
C2	Fichte	KP	100%	50%
C3	Fichte	KP	50%	100%
C4	Fichte	KP	150%	100%

Die Keilzinkenverbindungen zwischen nativer Fichte und nativer Fichte (Prüfkörper Typ B) als auch zwischen nativer Fichte und KP (Prüfkörper Typ C) wurden unter jeweils 5 verschiedenen Prozesseinstellungen untersucht, vgl. Tabelle 39. Die Herstellung erfolgte in drei Teilschritten: Im Ersten Schritt wurden einzelne Bretter mit einer Breite von 9 cm und einer Stärke von 2,2 cm abgerichtet. Die abgerichteten Bretter wurden visuell auf Fehlstellen, wie Äste, Faserabweichungen oder Risse untersucht. Bretter mit Rissen, starker Faserabweichung oder Äste wurden aussortiert.



Abbildung 225: Hydraulische Pressvorrichtung im Werk Deutsche Holzveredlung Schmeing GmbH & Co. KG

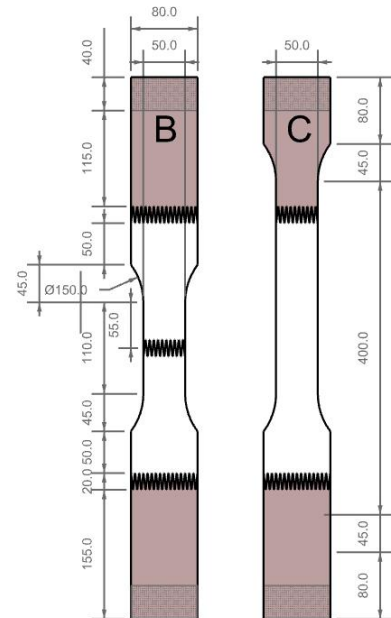


Abbildung 224: Geometrie der Prüfkörper B und C

Im zweiten Schritt wurden an den sortierten Brettern die Zinken gefräst und innerhalb von 6 Stunden verklebt. Dabei wurden die Flanken beider Fügepartnern mit Klebstoff benetzt und für 10 Sekunden zusammengepresst. Die verklebten Querschnitte wurden 72 Stunden nicht bewegt. Insgesamt wurden etwa 100 Rohquerschnitte hergestellt. Im dritten und letzten Schritt wurden die Bretter auf die endgültige Länge und Breite geschnitten und auf eine Stärke von 2,0 cm heruntergehobelt. Im Anschluss daran wurden die Prüfkörper mit Hilfe einer CNC-Fräse tailliert. Die Prüfgeometrie kann Abbildung 224 entnommen werden. Die Enden wurden aus KP vorgesehen, damit ein Bruch im Bereich des Einspannwerkzeugs infolge Querpressung ausgeschlossen werden konnte.

Prüfung und Dokumentation

Im Vorfeld der Prüfungen wurden erneut Prüfkörper aussortiert, die Fehlstellen im Bereich der Keilzinkenverbindung, wie Äste oder Risse aufwiesen. Für jede der unter Tabelle 39 aufgeführten Konfigurationen standen ca. 10 Prüfkörper zur Verfügung. Die Zugprüfungen fanden an der TU Kaiserslautern auf einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ statt. Die Prüfkörper wurden an den Enden hydraulisch eingespannt. Beim hydraulischen Einspannen wurde eine Zugkraft auf die Prüfkörper ausgeübt, die als Vorspannkraft in die Prüfprotokolle aufgenommen und bei der Ermittlung der Bruchspannung berücksichtigt wurde. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,85 - 0,9 mm/min. Es wurden Kraft, Weg und Zeit mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Nach der Prüfung

wurden an den Fichtequerschnitten aus den Reihen C – C4 die Dichte, die Jahrringbreite und die Faserabweichung bezogen auf die Prüfkörperachse bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 7, S. A-51 bis Prüfprotokoll 16, S. A-60 aufgeführt.

3.2.4 Keilzinkenverbindungen I-20 zwischen Fichte und KP (Referenzprüfung)

In Reihe O wurden Referenzprüfungen vorgenommen. Die Prozessparameter Fräsgeschwindigkeit, Klebstoff und Pressdruck waren die gleichen wie die für Reihe C (vgl. Kap. 3.2.3). Im Gegensatz zu Prüfreihe C bestand nur ein Ende aus KP, sodass die Herstellung deutlich einfacher war. Die Holzfeuchte lag bei der Herstellung und der Prüfung bei $u = 12\%$.

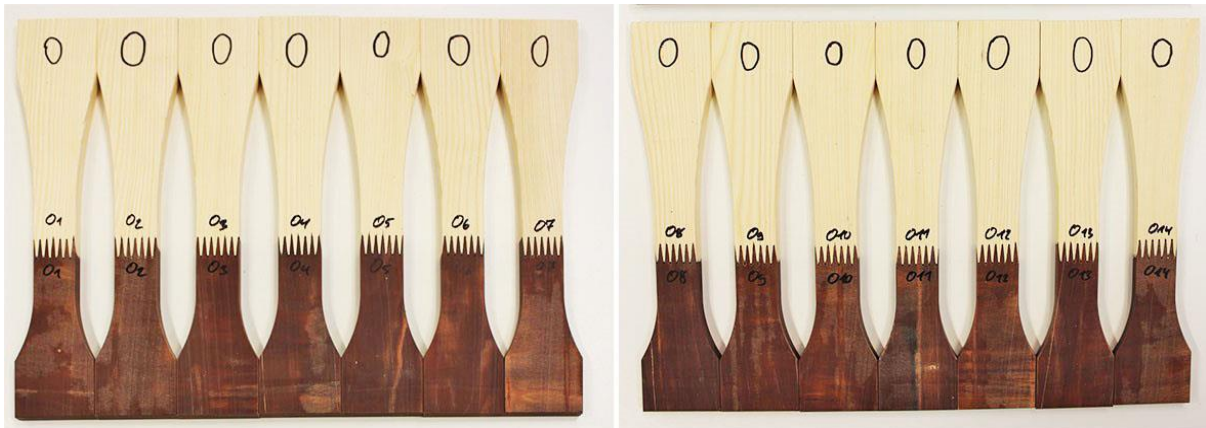
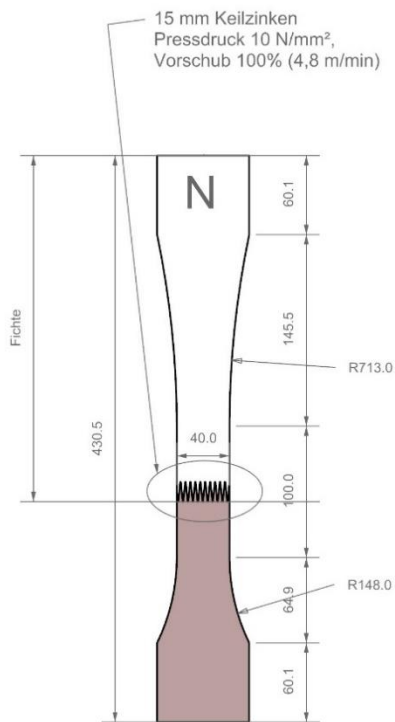


Abbildung 226: Prüfkörper Reihe O

Mit der Referenzprüfreihe O konnten die Festigkeitskennwerte aus Reihe C weitgehend bestätigt werden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 17, S. A-61 aufgeführt.

3.2.5 Keilzinkenverbindungen I-15 zwischen Fichte und KP



Es wurden Keilzinkenfestigkeiten an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 zwischen nativer Fichte und nativer Fichte als auch zwischen nativer Fichte und KP ermittelt. Für die Verklebung kam Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 zum Einsatz. Die Prüfkörper wurden von der Firma Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG mit einem neuen Keilzinkenfräskopf der Firma Emil Leitz GmbH hergestellt.

Die mittlere Dichte der nativen Fichte lag bei $0,480 \text{ g/cm}^3$. Die Holzfeuchte lag während der Produktion bei ca. 12 %. Die Keilzinken wurden mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 4,8 m/min gefräst und bei einem für das Normprofil empfohlenen Pressdruck von 10 N/mm^2 verklebt. Die Herstellung erfolgte in gleicher Weise wie die unter Kap. 3.2.3 beschriebene Herstellung. Die für die Versuchsreihen eingesetzte Prüfkörpergeometrie kann Abbildung 227 entnommen werden.

Abbildung 227: Optimierte Prüfkörpergeometrie

Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung unterschiedlich konditioniert, um die Auswirkung der Holzfeuchte auf die Keilzinkenfestigkeit in Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP zu quantifizieren. Die unterschiedlichen Konditionierungen und die daraus abgeleiteten Holzfeuchten können Tabelle 39 entnommen werden.

Prüfkörper der Reihen N und W1 wurden unter gleichen Bedingungen hergestellt und geprüft. Prüfkörper der Reihen W2 und W3 wurden gegenüber der Konditionierung während der Herstellung aufgefuehtet bzw. getrocknet, vgl. Abbildung 228. Prüfkörper der Reihe W4 wurden unter gleichen Holzfeuchten hergestellt und geprüft, jedoch wurden sie nach der Herstellung und vor der Prüfung einer sechsständigen Lagerung in kochendem Wasser und einer anschließenden einstündigen Lagerung in 20°C kaltem Wasser unterzogen (vgl. Tabelle 40). Dadurch wurde geprüft, inwieweit sich die Keilzinkenfestigkeit durch Alterungsprozesse der Klebfuge verändert, vgl. Abbildung 221, S. A-16.

(Anmerkung: Die Delaminationsprüfung wird in Kap. 3.1.2 beschrieben).

Tabelle 40: Konditionierung der Prüfkörper während der Herstellung und der Prüfung

	Reihe	N	W1	W2	W3	W4	
Herstellung	Konditionierung	$20^\circ\text{C} / 45\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	Wasserlagerung 8h 100°C
	Holzfeuchte u [%]	8%	12%	12%	12%	12%	
Prüfung	Konditionierung	$20^\circ\text{C} / 45\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	$20^\circ\text{C} / 45\%$	$20^\circ\text{C} / 90\%$	$20^\circ\text{C} / 65\%$	Wasserlagerung 8h 20°C
	Holzfeuchte u [%]	8%	12%	8%	18%	12%	



Abbildung 228: Konditionierung der Chargen N, W1, W2, W3, W4

Prüfung und Dokumentation

Im Vorfeld der Prüfungen wurden Prüfkörper aussortiert, die Fehlstellen im Bereich der Keilzinkenverbindung, wie Äste, oder Risse aufwiesen. Für jede der unter Tabelle 40 aufgeführten Konditionierungen standen ca. 10 Prüfkörper zur Verfügung. Die Zugprüfungen fanden an der TU Kaiserslautern auf einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ statt. Die Prüfkörper wurden an den Enden hydraulisch eingespannt. Beim hydraulischen Einspannen wurde eine Zugkraft auf die Prüfkörper ausgeübt, die als Vorspannkraft in die Prüfprotokolle aufgenommen und bei der Ermittlung der Bruchspannung berücksichtigt wurde. Die Prüfgeschwindigkeit betrug $1,5 \text{ mm/min}$. Es wurden Kraft, Weg und Zeit mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Nach der Prüfung wurden an den Fichtequerschnitten die Dichte bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 18, S. A-62 bis Prüfprotokoll 22, S. A-66 aufgeführt.

3.2.6 Keilzinkenverbindungen I-20 in KP

Zur Ermittlung des optimalen Pressdrucks bei der Keilzinkenverklebung zweier Querschnitte aus KP wurden Untersuchungen unter Variation des Pressdrucks durchgeführt. Zum Einsatz kam ein I-20 Vorzugsprofil des Herstellers Emil Leitz GmbH und Klebstoff des Typs Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018. Die Versuchsreihe wurden durch den Autor dieser Arbeit konzipiert. Die Untersuchungen fanden im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG in Kirchhundem statt, das auch die Herstellung der Prüfkörper übernahmen.

Herstellung

Die Keilzinkenverbindung wurde in KP des Typs BE335-1, 67 % L / 33 % Q vorgenommen. Die Herstellung der Prüfkörper erfolgte in zwei Teilabschnitten: Zunächst wurden in KP - Bretter Keilzinken gefräst. Die Keilzinkenflanken wurden anschließend mit Klebstoff benetzt und mittels der in Abbildung 229, links dargestellten hydraulischen Presse zusammengepresst. Der Pressdruck wurde für ca. 10 Sekunden aufrechterhalten. Die Prüfkörper wurden unter 5 unterschiedlichen Pressdrücken von $1,54 \text{ N/mm}^2$ bis $15,43 \text{ N/mm}^2$ verklebt.



Abbildung 229: Links: Pressvorrichtung für die Verklebung von KP mit KP; rechts fertiger Zugprüfkörper. Weißer Pfeil: Hydraulikkolben; roter Pfeil: Kraftmessdose; blaue Pfeile: Spannblöcke zur Sicherung beider zu verklebender Querschnitte.

72 Stunden nach dem Verkleben wurden im zweiten Teilabschnitt der Herstellung die Prüfkörperkonturen aus den verklebten Bretter, gemäß Abbildung 229, rechts gefräst. Die Vorder- wie auch die Rückseite wurde anschließend plangefräst.

Prüfung

Die Zugprüfung fand auf einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen der Marke Wohl und dem Steuerprogramm Doli Test&Motion statt.

Visuelle Begutachtung der Prüfkörper

Die Prüfkörper zeigten drei unterschiedliche Bruchbilder:



Abbildung 230: Bruchbilder bei Verklebungen mit einem Pressdruck von 1,54 N/mm (oben), 8,9 N/mm (Mitte), 15,4 N/mm (unten)

Bei niedrigem Pressdruck versagte die Keilzinkenverbindung vorwiegend im Bereich der Klebfuge, dabei blieb ein Großteil der gefrästen Zinken intakt, vgl. Abbildung 230, oben.

Bei Erreichen des optimalen Pressdrucks von etwa 9 N/mm², stellte sich der Bruch in erster Linie im Nettoquerschnitt entlang des Zinkengrundes ein, vgl. Abbildung 230, Mitte. Die Zinken brachen im Zinkengrund ab.

Beim Überschreiten des optimalen Pressdrucks zeigten sich wieder vermehrt Brüche entlang der Klebfuge, vgl. Abbildung 230, unten. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 23, S. A-67 und im Prüfprotokoll 24, S. A-68 aufgeführt.

3.3 Biegeversuche in Anlehnung an DIN 52186 (1978) und DIN EN 408 (2012)

3.3.1 Wirkungsgrad von KZV I-15 in Buchenholz

Zur Ermittlung des Wirkungsgrades von Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 unter Einsatz eines PUR-Klebstoffs des Typs Purbond HB S209 in Buchenholzquerschnitten mit einem Elastizitätsmodul $> 15.000 \text{ N/mm}^2$ wurden Biegeversuche an keilzinkenfreien und keilgezinkten Querschnitten durchgeführt. Die Prüfkörper wurden im Werk Schaffitzel GmbH & Co. KG in Schwäbisch Hall hergestellt. Die Presszeit lag bei 1,6 Sekunden der Pressdruck bei 18 N/mm^2 . Die Holzfeuchte der Prüfkörper lag bei der Verklebung bei $u = 12 \pm 2 \%$.

Die Biegefestigkeit wurde im 4-Punkt-Biegeversuch an 640 mm langen, 96 mm breiten und 20 mm starken Lamellen an der TU Kaiserslautern ermittelt (vgl. Abbildung 231). Die Holzfeuchte während der Biege-Prüfung lag bei $10 \pm 2 \%$. Dokumentiert wurde die Durchbiegung in Feldmitte als auch die Kraft, die während des Versuchs aufgebracht wurde. (Graf et al. 2018)

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 25, S. A-69 und im Prüfprotokoll 26, S. A-70 aufgeführt.

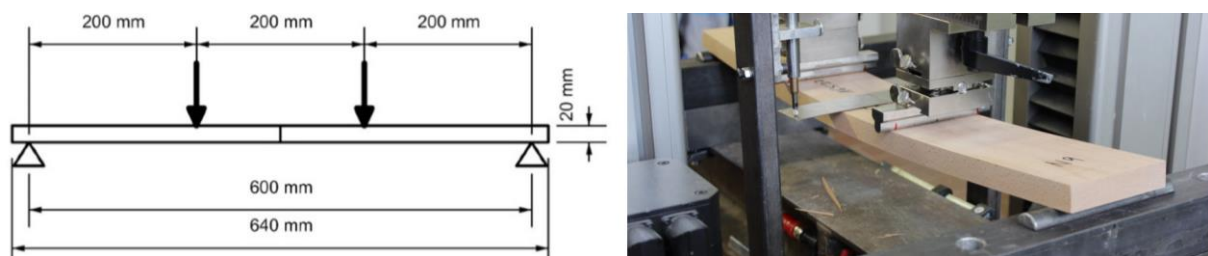


Abbildung 231: Biegeversuch

3.3.2 Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeit von KZV I-15 in Buchenholz

Es wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf die mechanischen Eigenschaften von keilzinkenfreien und keilgezinktem Buchenholz mittels Biegeprüfungen an Biegeprüfkörpern bestimmt. Die Keilzinken wurden mit einem Vorzugsprofil I-15 gefräst und mit PUR-Klebstoff -Typ Purbond HB S209 – verklebt.

Die Prüfkörper wurden vom Fachgebiet Tragwerk und Material der TU Kaiserslautern im Dezember 2017 im Rahmen des Seminars Technologie des Holzes hergestellt. Sie wurden aus astfreien Buchenlamellen (2,4 cm x 10,5 cm 240 cm), deren dynamischer Elastizitätsmodul und deren Dichte im Vorfeld durch die Firma Schaffitzel GmbH und Co. KG - bei einer Holzfeuchte von $u \sim 10 \%$ - maschinell bestimmt worden ist, gewonnen. Aus sechs dieser Buchenlamellen, deren dynamischer Elastizitätsmodul zwischen 13.502 N/mm^2 und 13.968 N/mm^2 und deren Dichte zwischen 629 kg/m^3 und 717 kg/m^3 lag, wurden - bei einer Holzfeuchte von $u \sim 10 \%$ - je 2 x 4 Biegeprüfkörper mit den Abmessung 20 mm x 20 mm x 640 mm herausgetrennt. Pro Brettlamelle wurden demnach 8 Prüfkörper gewonnen die mittels des Trockenschanks, des Klimaschanks sowie einer Innen- und Außenraumlagerung auf unterschiedlichste Holzfeuchten konditioniert worden sind.

Versuchsdurchführung

Die Vier – Punkt - Biegeprüfungen fanden im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem weggesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{\max} = 50 \text{ kN}$ statt. Die Prüfungsgeschwindigkeit betrug $7,2 \text{ mm/min}$. An 7 Prüfkollektiven mit unterschiedlichen Holzfeuchten wurden an jeweils 6 Prüfkörpern Biegeprüfungen durchgeführt. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet. Die Holzfeuchten wurden nach der Biegeprüfung durch die Darmmethode bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 27, S. A-71 bis Prüfprotokoll 29, S. A-73 aufgeführt.



Abbildung 232: Biegeversuch an nativem Buchenholz

3.3.3 Einfluss der Klebstoffart auf die Festigkeit von KZV I-15



Abbildung 233: Pressvorrichtung für die Herstellung von Keilzinkenverbindungen

Es wurde der Einfluss unterschiedlicher Klebstoffe auf die Festigkeit von Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 in Buchenlamellen mit einem Elastizitätsmodul $> 15.000 \text{ N/mm}$ untersucht. Als Klebstoff kamen ein MUF Klebstoff (Kauramin 683 mit Härter Kauramin 688) und ein PRF Klebstoff (Aerodux 185 mit Härter HRP 155) zum Einsatz. Die Holzfeuchte während der Holzbearbeitung und der Prüfung lag bei 12% und wurde durch Lagerung im Klimaschrank unter Normklima konstant gehalten. Die Keilzinken wurden im T-Lab der TU Kaiserslautern gefräst und innerhalb sechs Stunden verklebt. Die Lamellenstärke betrug beim Fräsen 24 mm . Der Klebstoff wurde mit einem Pinsel manuell auf die Zinkenflanken beider Fügeteilpartner aufgebracht. Im Anschluss wurden die Fügeteilquerschnitte per Hand zusammengeschoben und danach in die Pressvorrichtung gestellt (vgl. Abbildung 233).

Der Pressdruck wurde mit einer Kolbengeschwindigkeit von 5 mm/min auf 10 N/mm² gesteigert und für 15 Sekunden aufrecht gehalten. Danach wurden die Prüfkörper bis zur Klebstoffaushärtung horizontal gelagert. Nach dem Aushärten wurden die Prüfkörper auf eine Stärke von 20 mm gehobelt und in 20 mm starke Streifen geschnitten. Die fertiggestellten Prüfkörper hatten die Abmessung von $l = 640$ mm, $b = 20$ mm und $h = 20$ mm.

Die Biegeprüfung wurde in Gebäude 62 der TU Kaiserslautern bei 20 °C durchgeführt. Bis zur Biegeprüfung wurden die Prüfkörper in Frischhaltefolie gelagert um ein Austrocknen zu verhindern. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 4,3 mm/min. Dokumentiert wurden Kraft und Verformung in Feldmitte. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 30, S. A-74 und im Prüfprotokoll 31, S. A-75 aufgeführt.

3.3.4 Einfluss der Prüfmethodik auf die Festigkeit von KZV I-15

Um den Einfluss unterschiedlicher Prüfgeschwindigkeiten zu quantifizieren wurden Biegeprüfungen an keilgezinkten Querschnitte aus Buchenholz durchgeführt. Die Prüfkörper wurden analog der Prüfkörper in Kap. 3.3.3 hergestellt und gelagert. Die Prüfkörperabmessungen betrugen 640 mm x 20 mm x 20 mm.



Abbildung 234: Biegeprüfung an Keilzinkenverbindungen zwischen Buche und Buche

Die Biegeprüfungen fanden als Vier – Punkt - Biegeprüfungen im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{\max} = 50$ kN statt. Die Prüfgeschwindigkeit variierte von 3,5 mm/min, 12 mm/min und 24 mm/min. Es wurden je 10 Versuche durchgeführt, wobei Prüfkörper aus ein und derselben Brettlamelle unter den drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten geprüft wurden. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 32, S. A-76 bis Prüfprotokoll 34, S. A-78 aufgeführt.

3.3.5 Einfluss der Holzfeuchte auf die Festigkeit von KZV I-15 zwischen Fichte und KP

Zur Prüfung der Dauerhaftigkeit von Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP wurden in Reihe 1 (n = 40) keilgezinkte Prüfkörper mit unterschiedlichen Holzfeuchten auf Biegung geprüft. In Reihe 2 (n = 40) wurden keilgezinkte Prüfkörper einer mehrfachen zyklischen Trocknung und Auffeuchtung unterzogen bevor sie einer Biegeprüfung unterzogen wurden.

Für die Versuchsdurchführung standen 20 Bretter zur Verfügung, die eine Keilzinkenverbindung zwischen nativem Nadelholz und KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q aufwiesen. Das Nadelholz entstammt Bauholz der Festigkeitsklasse C24; dieses wurde unter Normalklima bis zur Holzausgleichsfeuchte gelagert. Die Keilzinkenverbindungen wurden im November 2017 im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG mit einem Vorzugsprofil I-15 gefräst und mit Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 verklebt. Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung in Folie verpackt, sodass sich während des Transportes bis zur TU Kaiserslautern keine Änderung der Holzfeuchte einstellte. Unmittelbar nach der Ankunft am T-Lab wurde mittels Einschlagelektrode die Holzfeuchte an zufällig ausgewählten Brettern mit 12 % bestätigt. Bis zur Prüfung wurden die Prüfkörper im Klimaschrank unter Normalklima gelagert.

Eine visuelle Begutachtung der Keilzinkenverbindung ergab, dass die hergestellten Keilzinkenverbindungen ein sehr großes Zinkenspiel aufwiesen, was auf eine tendenziell schlechte Verklebung und daher auch geringe Keilzinkenfestigkeit hindeutet. Aus diesem Grund kann die ermittelte Biegefestigkeit dieser Versuchsscharge nicht unmittelbar mit der Versuchsscharge unter Kap. 3.3.6, S. A-31 verglichen werden. Ein qualitativer Vergleich der Leistungsfähigkeit unter veränderten klimatischen Bedingungen ist jedoch zulässig.

Konditionierung Reihe 1

Aus insgesamt 10 Hybridbrettern mit mittiger Keilzinkenverbindung wurden jeweils 4 Prüfkörper mit einer Abmessung von 640 mm x 20 mm x 20 mm herausgetrennt. Die 10 x 4 Prüfkörper wurden bis zur Biegeprüfung wie folgt konditioniert:

- Prüfkörper 1A – 10A** wurden unverändert im Normalklima bis zur Biegeprüfung gelagert.
- Prüfkörper 1C – 10C** wurden auf 0 % Holzfeuchte heruntergetrocknet und bei 0 % Holzfeuchte einer Biegeprüfung unterzogen.
- Prüfkörper 1B – 10B** wurden zunächst auf 0 % Holzfeuchte heruntergetrocknet und anschließend bis auf 22 % Holzfeuchte aufgefuechtet. Danach wurden sie erneut darrgetrocknet und dann unter Normalklima bis zur Biegeprüfung auf 12 % Holzfeuchte konditioniert.
- Prüfkörper 1D – 10D** wurden auf 21 % Holzfeuchte aufgefuechtet und bei 21 % einer Biegeprüfung unterzogen.

Konditionierung Reihe 2

Aus insgesamt 10 Hybridbretten mit mittiger Keilzinkenverbindung wurden jeweils 4 Prüfkörper mit einer Abmessung von 640 mm x 20 mm x 20 mm herausgetrennt. Die 10 x 4 Prüfkörper wurden bis zur Biegeprüfung wie folgt konditioniert:

Prüfkörper 1A – 10A wurde weiterhin unter Normalklima gelagert und bei einer Holzfeuchte von $u = 12\%$ geprüft.

Prüfkörper 1B – 10B wurde zyklisch (vgl. Abbildung 235) ($n = 5$) auf eine Holzfeuchte von $u = 0\%$ getrocknet und auf eine Holzfeuchte von $u = 20\%$ aufgefuehrt. Getrocknet wurden die Prüfkörper bei 103°C , aufgefuehrt bei 20°C und 90% relativer Luftfeuchtigkeit.

Prüfkörper 1C – 10C wurde zyklisch (vgl. Abbildung 235) ($n = 10$) auf eine Holzfeuchte von $u = 0\%$ getrocknet und auf eine Holzfeuchte von $u = 22\%$ aufgefuehrt. Getrocknet wurden die Prüfkörper bei 103°C und aufgefuehrt bei 20°C , 90% relativer Luftfeuchtigkeit.

Prüfkörper 1D – 10D wurde im Wasserbad über Fasersättigung aufgefuehrt und anschließend im Trockenschrank darrgetrocknet. Die Prüfkörper durchliefen 15 Zyklen.

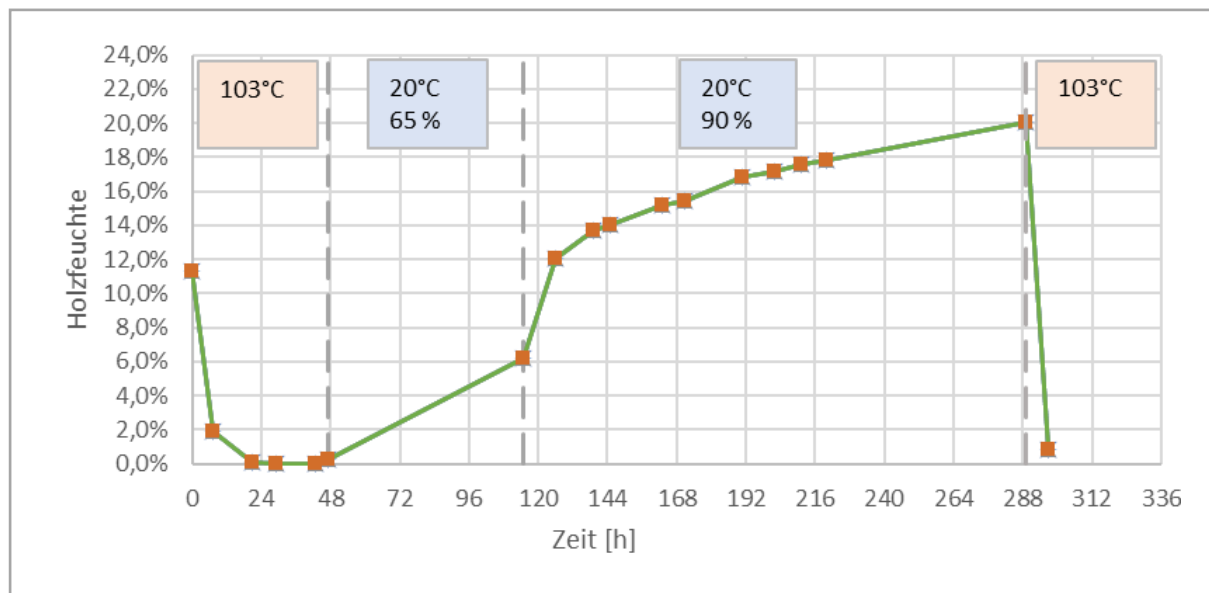


Abbildung 235: Dokumentation des Trocknungs-Auffeuchtezyklus im Klimaschrank

Prüfung

Die Biegeprüfungen fanden als Vier – Punkt - Biegeprüfungen im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{\max} = 50\text{ kN}$ statt. Die Prüfungsschwindigkeit variierte von $2,3\text{ mm/min}$ bis $3,2\text{ mm/min}$. Jedes der insgesamt 8 Prüfkollektive bestand aus 10 Prüfkörpern. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 35, S. A-79 bis Prüfprotokoll 42, S. A-86 aufgeführt.



Abbildung 236: Biegeprüfung an Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und K

3.3.6 Einfluss der Holzfeuchte und der Dichte auf die Festigkeit von KZV I-20

An Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP wurden Festigkeitskennwerte mittels Vier-Punkt-Biegeprüfung als Hochkantbiegung (HK) und Flachkantbiegung (FK) bei Holzfeuchten von 0 % / 7 % und 12 % ermittelt.

Prüfkörper

Die Prüfkörper bestanden aus Fichte und KP BE335-1 mit 67 % Längs- und 33 % Querlagen und wurden mit Keilzinken des Typs I-20 verklebt. Als Klebstoff wurde ein Resorzinharzklebstoff: Bakelite PF 0283 HL, PFH 0183 H verwendet. Die Prüfkörperabmessungen der Flachkantbiegeprüfung betrugen: $l \sim 250$ mm; $b \sim 23$ mm; $h \sim 15$ mm, die der Hochkantbiegeprüfung $l \sim 250$ mm; $b \sim 15$ mm; $h \sim 23$ mm. Die exakten Abmessungen wurden mittels einer digitalen Schieblehre vor jeder Prüfung neu bestimmt und können den beigefügten Prüfprotokollen entnommen werden. Die Prüfkörper wurden im Klimaschrank (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchte), im Trockenschrank (103 °C) und im beheizten Innenraum (20 °C / 40 % rel. Luftfeuchte) gelagert. Die Holzfeuchten wurden für jeden Prüfkörper im Anschluss der Prüfung mittels Darmmethode bestimmt. Die Holzfeuchten der jeweiligen Prüfkörper können ebenfalls den Prüfprotokollen entnommen werden.

Im Forschungsprojekt *Entwicklung neuartiger Knotenverstärkungen von Holztragwerken* wurde die Zugfestigkeit der Keilzinkenverbindung im taillierten Bereich des Prüfkörpers ermittelt (Reihe C). Hier stellte sich für gewöhnlich der Bruch ein. Die Prüfkörper für die hier thematisierte Biegeprüfung wurden aus dem noch intakten Bereich (Abbildung 237, links) gewonnen. Aus diesem wurden je zwei Prüfkörper herausgetrennt, die unterschiedlich konditioniert wurden oder eine Flachkantbiegeprüfung und einer Hochkantbiegeprüfung unterzogen wurden. Unter der Annahme, dass die Holzqualität im

ursprünglichen Prüfkörper über die Prüfkörperlänge konstant ist, können für ein und denselben Prüfkörper also insgesamt drei Kennwerte abgeleitet werden. Ein Einfluss durch unterschiedliche Lieferchargen kann also ausgeschlossen und die Daten unmittelbar miteinander verglichen werden.

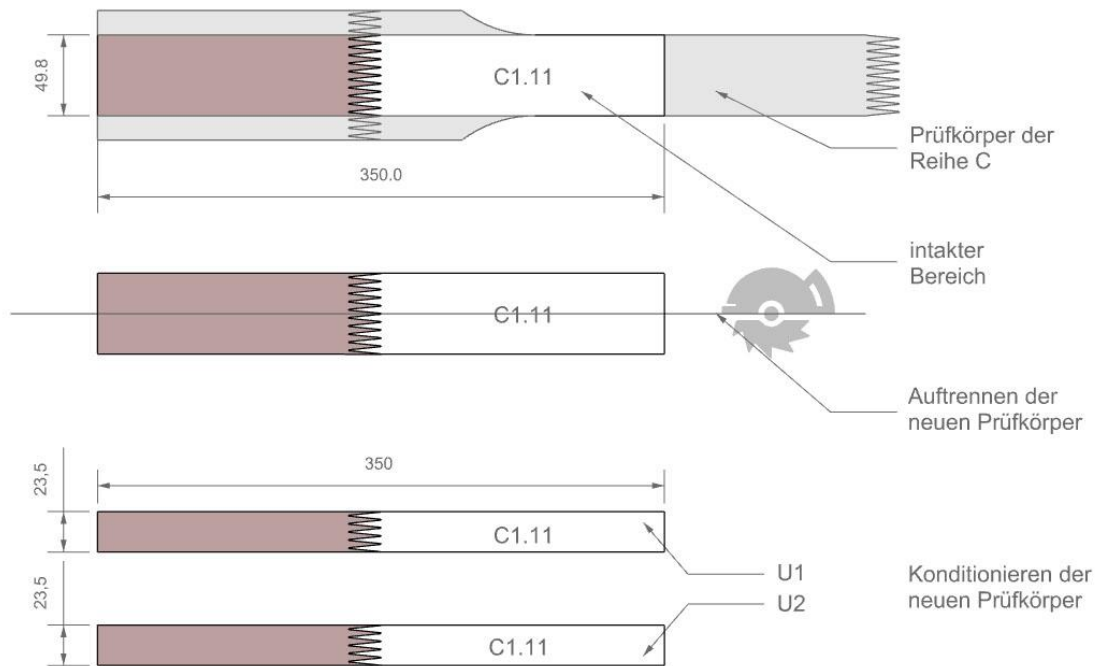


Abbildung 237: Prinzip der Prüfkörpergewinnung für die "Zweitprüfung"

Prüfung

Die Prüfungen fanden im Februar und im März 2018 im T-Lab der TU-Kaiserslautern an einem Weggesteuerten Zweisäulenprüfrahmen statt. Die Biegefestigkeiten wurden mittels Vier-Punkt-Biegeprüfung ermittelt. Die Krafteinleitung fand in den Drittelpunkten der Prüfkörper statt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1,5 mm/min für Flachkantbiegeprüfungen und 0,75 mm/min für Hochkantbiegeprüfungen. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 43, S. A-87 bis Prüfprotokoll 46, S. A-90 aufgeführt.

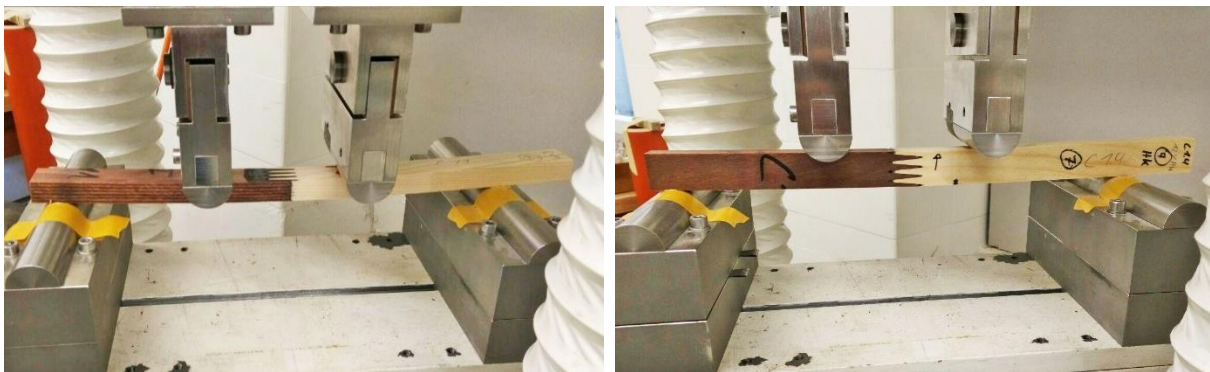


Abbildung 238: Biegeversuch an Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP, links Flachkantbiegeversuch, rechts Hochkantbiegeversuch

3.3.7 Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die Festigkeit von KZV I-15

Es wurde der Einfluss von Dichte- und von Elastizitätsmodulsdifferenzen der Fügeteilpartner auf die Keilzinkenfestigkeit untersucht. Dazu wurden aus unterschiedlichen Dachlatten 63 Querschnitte der Abmessung $l = 400 \text{ mm}$, $b = 52 \text{ mm}$, und $h = 31 \text{ mm}$ geschnitten. Anschließend wurden die Querschnitte in Klimaschrank unter Normalklima gelagert. Nachdem sich eine Holzausgleichsfeuchte von ca. $u = 12 \%$ eingestellt hatte, wurden die Dichte durch Wägung und der Bieg-Elastizitätsmodul durch zerstörungsfreie Dreipunktbiegung (vgl. Abbildung 239, rechts) an den einzelnen Querschnitten bestimmt. Die Ergebnisse können Tabelle 41 entnommen werden:

Tabelle 41: Dichte und Elastizitätsmodul der Einzelquerschnitte

Brettnr.	E-Modul	Dichte	Brettnr.	E-Modul	Dichte	Brettnr.	E-Modul	Dichte	Brettnr.	E-Modul	Dichte
	[N/mm ²]	[g/cm ³]		[N/mm ²]	[g/cm ³]		[N/mm ²]	[g/cm ³]		[N/mm ²]	[g/cm ³]
1	5455	0,35	17	7177	0,39	33	7664	0,43	49	11005	0,51
2	4842	0,35	18	5169	0,39	34	10812	0,44	50	8805	0,47
3	6010	0,36	19	7438	0,40	35	11079	0,43	51	10249	0,48
4	6026	0,36	20	6807	0,40	36	9883	0,44	52	9234	0,48
5	7037	0,36	21	7686	0,39	37	8321	0,43	53	9272	0,48
6	6999	0,36	22	9196	0,41	38	10741	0,44	54	9821	0,48
7	6449	0,36	23	5863	0,41	39	10741	0,44	55	10161	0,48
8	5173	0,37	24	5833	0,41	40	11410	0,44	56	9579	0,48
9	6155	0,37	25	8079	0,42	41	10755	0,45	57	10074	0,49
10	8333	0,37	26	4187	0,41	42	10137	0,44	58	10662	0,49
11	5394	0,38	27	10849	0,43	43	10396	0,45	59	10338	0,49
12	6807	0,38	28	6777	0,42	44	10814	0,45	60	9780	0,49
13	5633	0,38	29	9685	0,43	45	11303	0,46	61	9501	0,53
14	4710	0,38	30	10360	0,43	46	11706	0,47	62	10854	0,54
15	7195	0,39	31	8770	0,43	47	11061	0,47	63	10757	0,54
16	6998	0,38	32	9013	0,43	48	11425	0,51			

Prüfkörper

Aus dem Brett Kollektiv wurden Pärchen mit geringem Dichteunterschied (0 bis < 15 %) und Pärchen mit großem Dichteunterschied (> 15 % und bis 47 %) gebildet. Die Keilzinken wurden mit einem Profil I-15 gefräst und mit dem Klebstoff Aerodux 185 mit dem Härter HRP 155 verklebt. Das Fräsen und Verkleben wurde analog Kap. 3.3.3 ausgeführt. Nach dem Verkleben wurden die Prüfkörper auf ein Querschnittsmaß von 44 mm x 26 mm gehobelt und bis zur Prüfung im Klimaschrank unter Normalklima gelagert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 47, S. A-91 und im Prüfprotokoll 48, S. A-92 aufgeführt.

Tabelle 42: Prüfkörperbildung

Prüf- körper	Teil	Brettnr.	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Dichteunter- schied	Kollektiv
1	A	8	5173	0,370	5%	K1
	B	18	5169	0,388		
2	A	13	5633	0,381	8%	K1
	B	24	5833	0,410		
4	A	28	6777	0,424	19%	K2
	B	5	7037	0,357		
5	A	17	7177	0,392	1%	K1
	B	15	7195	0,394		
6	A	33	7664	0,430	11%	K1
	B	21	7686	0,388		
7	A	37	8321	0,435	9%	K1
	B	50	8805	0,474		
8	A	32	9013	0,433	0%	K1
	B	31	8770	0,427		
9	A	26	4187	0,413	16%	K2
	B	53	9272	0,478		
10	A	29	9685	0,428	12%	K1
	B	54	9821	0,479		
11	A	57	10074	0,485	2%	K1
	B	51	10249	0,476		
12	A	55	10161	0,479	2%	K1
	B	59	10338	0,487		
13	A	39	10741	0,442	1%	K1
	B	41	10755	0,445		
14	A	58	10662	0,487	11%	K1
	B	34	10812	0,437		
15	A	45	11303	0,460	11%	K1
	B	48	11425	0,512		
16	A	2	4842	0,353	35%	K2
	B	46	11706	0,475		

Prüf- körper	Teil	Brettnr.	E-Modul [N/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Dichteunter- schied	Kollektiv
17	A	14	4710	0,377	17%	K2
	B	40	11410	0,443		
18	A	11	5394	0,376	15%	K2
	B	35	11079	0,434		
19	A	1	5455	0,347	47%	K2
	B	49	11005	0,511		
20	A	4	6026	0,357	22%	K2
	B	27	10849	0,434		
21	A	3	6010	0,355	32%	K2
	B	47	11061	0,468		
22	A	12	6807	0,381	16%	K2
	B	38	10741	0,441		
23	A	20	6807	0,402	12%	K1
	B	44	10814	0,450		
24	A	16	6998	0,380	13%	K1
	B	30	10360	0,428		
25	A	6	6999	0,362	24%	K2
	B	43	10396	0,449		
26	A	19	7438	0,401	11%	K1
	B	42	10137	0,444		
27	A	23	5863	0,413	7%	K1
	B	36	9883	0,442		
28	A	25	8079	0,417	15%	K2
	B	56	9579	0,481		
29	A	10	8333	0,366	35%	K2
	B	60	9780	0,492		
30	A	52	9234	0,476	17%	K2
	B	22	9196	0,405		
31	A	62	10854	0,539	0%	K1
	B	63	10757	0,541		

Prüfung

Die Biegeprüfungen fanden als Vier-Punkt-Biegeprüfungen mit Lasteinleitung in den Drittelpunkten (vgl. Abbildung 239, links) im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen (Marke Wekob) mit $F_{\max} = 50 \text{ kN}$ statt. Die Prüfgeschwindigkeit lag bei 2,5 mm/min. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet.



Abbildung 239: Biegeprüfungen: links 4-P-Biegeprüfung an keilgezinktem Fichtenprüfkörper, rechts 3-P-Biegeprüfung an Fügepartner

3.4 Druckversuche in Anlehnung an DIN 52185 (1976) und DIN EN 408 (2012)

3.4.1 Bestimmung der Druckfestigkeit von KP BE 335-1

Es wurden Druckversuche an je 10 Prüfquadern aus KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q, 50 % L / 50 % Q, 33 % L / 67 % Q, Buche und Fichte mit den Abmessungen $l = 40 \text{ mm} \times b = 20 \text{ mm} \times t = 20 \text{ mm}$ zur Bestimmung der Druckfestigkeit in Plattenebene (KP) und in Faserlängsrichtung (Buche, Fichte) durchgeführt. Die Versuche wurden in der Prüfhalle 60 des Fachbereichs Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern bei ca. 20°C auf einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug $1,35 \text{ mm/min}$. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 49, S. A-93 bis Prüfprotokoll 51, S. A-95 aufgeführt.

3.4.2 Druckversuch an Keilzinkenverbindungen I-15

Keilzinkenverbindungen können neben einer Zugbeanspruchung und neben einer Biegebeanspruchung auch einer Druckbeanspruchung ausgesetzt sein. Im Druckversuch an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15 wurde das Festigkeitsverhalten in Keilzinkenverbindungen zwischen Fichte und KP untersucht.

Die Keilzinkenverbindung wurde zwischen KP BE 335-1, 67 % L / 33 % Q und nativem Nadelholz C24 mit einer Holzfeuchte von 12 % ausgeführt. Die Keilzinkenverbindungen wurden im April 2017 im Werk Deutsche Holzveredelung Schmeing GmbH & Co. KG mit einem Vorzugsprofil I-15 gefräst und mit Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018 verklebt. Die Prüfkörper wurden nach der Herstellung in Folie verpackt, sodass sich während des Transportes bis zur TU Kaiserslautern keine Änderung der Holzfeuchte einstellte. Bis zur Prüfung wurden die Prüfkörper im Klimaschrank unter Normalklima gelagert.

Prüfung

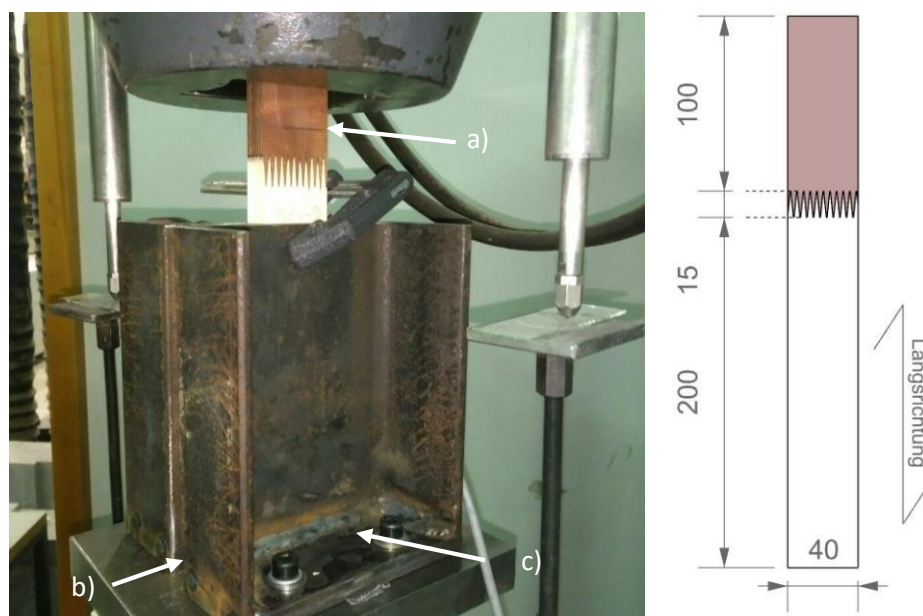


Abbildung 240: Druckversuch an Keilzinkenverbindungen des Typs I-15

Die Druckprüfungen fanden bei ca. 20 °C auf einem Weg - gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ statt. Die Prüfkörperabmessungen betrugen 315 mm x 40 mm x 15 mm. Die Prüfkörper wurden mittels hydraulischen Einspannbacken am KP-Ende (Abbildung 240, a)) in die Prüfmaschine eingespannt und standen am anderen Ende auf einer Stahlplatte auf (Abbildung 240, b)). Um ein Knicken der Prüfkörper zu verhindern wurden sie seitlich durch verstellbare Metallprofile (Abbildung 240, c)) gehalten. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,44 mm/min. In allen Versuchen wurde die Kraft als auch der Verfahrweg mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 52, S. A-96 aufgeführt.

3.5 Lochleibungsversuche in Anlehnung an DIN EN 383 (2007)

3.5.1.1 LL-Druckversuche

Die hohe Druckfestigkeit und Lochleibungsfestigkeit von KP führt unter den in DIN EN 383 (2007) beschriebenen Versuchsaufbauten, bei denen die Kraft über ein an den beiden Stirnflächen gehaltenes stiftförmiges Verbindungsmittel in die Lochleibung eingeleitet wird, zu einer starken elastischen Verformung des Verbindungsmittels und damit zu einer ungleichmäßigen Beanspruchung der Lochleibungsfläche. Die ungleichmäßige Beanspruchung führt zu einem vorzeitigen Versagen des Prüfkörpers und damit zu verfälschten Prüfergebnissen. Um eine gleichmäßige Beanspruchung der Lochleibung zu gewährleisten wurde der in DIN EN 383 (2007, S.6) beschriebene Druckversuch dahingehend verändert, dass die Kraft durch einen Druckstempel in eine halbkreisförmige Schale eingeleitet wird (vgl. Abbildung 241, links). Das Versuchsende wurde mit dem Aufspalten des Holzquerschnitts bzw. bei einer plastischen Verformung der Lochleibung von 5 mm definiert.

Der Randabstand l_2 lag bei den Versuchen mit Bolzen des Durchmessers $d = 20 \text{ mm}$ bei $11 \times d$, bei Bolzen des Durchmessers $d = 30 \text{ mm}$ bei $7,3 \times d$ und bei Bolzen des Durchmessers $d = 40 \text{ mm}$ bei $5,5 \times d$. Die Bolzen wurden aus Einsatzstahl (Kaltfließpresstahl) 16MnCr5 gefertigt.

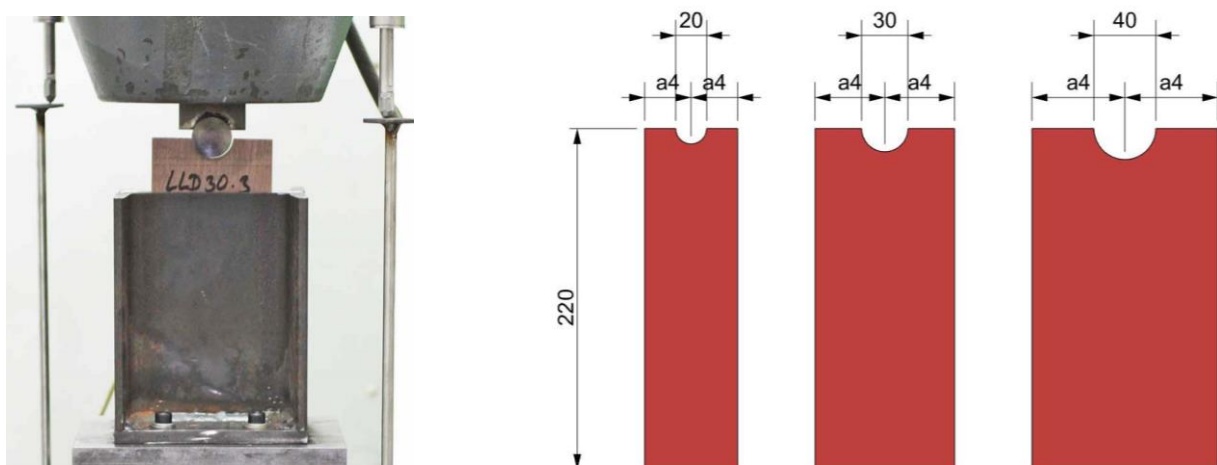


Abbildung 241: Links: Versuchsaufbau, rechts Geometrie der Prüfkörper

Versuch

Die Versuche wurden in der Prüfhalle 60 des Fachbereichs Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern bei ca. 20 °C auf einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 200 \text{ kN}$ durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 1,35 mm/min.

Für die Druckversuche wurde eine Halterung hergestellt, die eine genaue Ausrichtung der Prüfkörper in Kraftrichtung gewährleistete und ein seitliches Ausweichen und Knicken der Prüfkörper verhinderte, vgl. Abbildung 241, links. Um Reibungseffekte zwischen Prüfkörper und Stahlhalterung möglichst auszuschließen wurden zwischen die sich berührenden Oberflächen Polyethylenfolien positioniert.

Abweichend von DIN EN 383 (2007, S. 6) wurden die Versuche bei kleinerem Randabstand a_4 (bezeichnet als a_1 in Norm DIN EN 383) und ohne Belastungsvorzyklus durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 53, S. A-97 aufgeführt.

3.5.1.2 Lochleibungsversuche (Zug-Prüfung)

Es wurden Versuche zur Bestimmung der Lochleibungsfestigkeit von KP mit zylindrischen Verbindungsmitteln mit einem Durchmesser von $d = 8 \text{ mm}$ bis $d = 60 \text{ mm}$ durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle führt Art und Umfang der durchgeführten Versuche auf:

Tabelle 43: Durchgeführte Versuche zylindrischer Verbindungsmittel in KP

[n=112]	kleine Durchmesser					große Durchmesser									
d [mm]	8	8	8	10	20	30	40	40	50	60	60				
BE 3351	67%L/33%Q	50%L/50%Q	50%L/50%Q	67%L/33%Q	67%L/33%Q	67%L/33%Q	67%L/33%Q	50%L/50%Q	67%L/33%Q	67%L/33%Q	50%L/50%Q				
t[mm]	15	10	10	15	15	15	15	15	10	15	15				
λ [t/d]	1,9	1,3	1,3	1,5	0,8	0,5	0,4	0,4	0,2	0,3	0,3				
Verbindungsmittel	Bolzen	Bolzen	M8	M10	Bolzen	Bolzen	Bolzen	Bolzen	Bolzen	Bolzen	Bolzen				
a_4	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d	1,5d				
a_3	-	-	-	-	-	1,5	[5]	1,5	[6]	1,5	[6]	1,5	[6]	1,5	[7]
	-	-	-	-	-	2,0	[5]	2,0	[7]	2,0	[7]	-	-	2,0	[7]
	2,5	[6]	2,5	[5]	2,5	[6]	2,5	[6]	-	-	2,5	[7]	-	2,5	[7]

Wie Tabelle 43 zu entnehmen ist, wurden die Prüfungen unter unterschiedlich großen Schlankheitsgraden ($\lambda = t/d$) durchgeführt. Der Schlankheitsgrad fiel insbesondere bei den Untersuchungen an kleinen Querschnitt ungünstiger aus als bei den Untersuchungen an großen Querschnitten. Dies hängt mit der gewählten Stärke der KP-Prüfkörper zusammen. Da sich die Querschnitte aus ca. 0,8 mm starken Furnieren zusammensetzen, kann bei besonders schmalen Querschnitten nicht gewährleistet werden, dass die Anteile der Furniere in Primär- und in Sekundärrichtung exakt den Vorgaben von 50 % / 50 % bzw. 67 % / 33 % entsprechen. Aus diesem Grund lag die Stärke bei allen Prüfungen bei 10 mm – 15 mm.

Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden über mehrere Monate hinweg sowohl im T-Lab der TU Kaiserslautern als auch in der Prüfhalle Bau 60 (Fachbereich Bauingenieurwesen) durchgeführt. Die Versuche fanden als Zugversuche an jeweils einem Weg gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen statt. Die zu prüfenden Querschnitte wurden gemäß Abbildung 242 an den Enden in jeweils einer Stahlzange gehalten. Die Bohrung des Prüfkörpers war 0,1 mm größer als das Verbindungsmittel. Das Verbindungsmittel wurde aus Einsatzstahl (Kaltfließpressstahl) 16MnCr5 gefertigt.

Das Versuchsende wurde mit dem Aufspalten des Holzquerschnitts, mit dem Reißen des Nettoquerschnitts bzw. bei einer plastischen Verformung der Lochleibung von 5 mm definiert. Abweichend von DIN EN 383 (2007, S. 6) wurden die Versuche bei kleinerem Randabstand a_4 und a_3 und ohne Belastungsvorzyklus durchgeführt. Dokumentiert wurden jeweils Kraft und Weg. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde so gewählt, dass der Bruch nach ca. 300 ± 60 Sekunden eintrat.

Die Prüfkörper zur Prüfung der Durchmesser $d = 20$ mm, $d = 40$ mm und $d = 60$ mm entstammten aus einer Liefercharge (Charge 1), die Prüfkörper zur Prüfung der Durchmesser $d = 30$ mm und $d = 50$ mm einer zweiten (Charge 2). Die Prüfkörper zur Prüfung der Durchmesser $d = 8$ mm und $d = 10$ mm wurden aus intakten Bereichen geprüfter Querschnitte aus Charge 1 gewonnen. Die für die Lochleibungsprüfung eingesetzten Verbindungsmittel der Durchmesser $d = 20$ mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm waren aus Stahl 16MnCr5. Der Mindestwert der Zugfestigkeit dieser Bolzen liegt nach DIN EN ISO 683-3 (2019, S.41) bei:

$$f_u = 1000 \text{ N/mm}^2; \text{ bis } d = 16 \text{ mm}$$

$$f_u = 800 \text{ N/mm}^2; \text{ von } d = 16 \text{ mm bis einschließlich } d = 40 \text{ mm}$$

$$f_u = 600 \text{ N/mm}^2; \text{ von } d = 40 \text{ mm bis einschließlich } d = 100 \text{ mm}$$

Die für die Lochleibungsprüfung eingesetzten Verbindungsmittel der Durchmesser $d = 8$ mm, 10 mm waren aus Stahl S355 mit einer Zugfestigkeit $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 54, S. A-98 bis Prüfprotokoll 61, S. A-105 aufgeführt.



Abbildung 242: Vorrichtungen zur Durchführung von Lochleibungsversuchen, links: Prüfung der Durchmesser $d = 8$ mm und $d = 10$ mm, rechtes Prüfung der Durchmesser $d = 20$ mm, $d = 30$ mm, $d = 40$ mm, $d = 50$ mm, $d = 60$ mm

3.5.1.3 Lochleibungsversuche an Schrauben und an Bolzen mit $d = 8 \text{ mm}$.

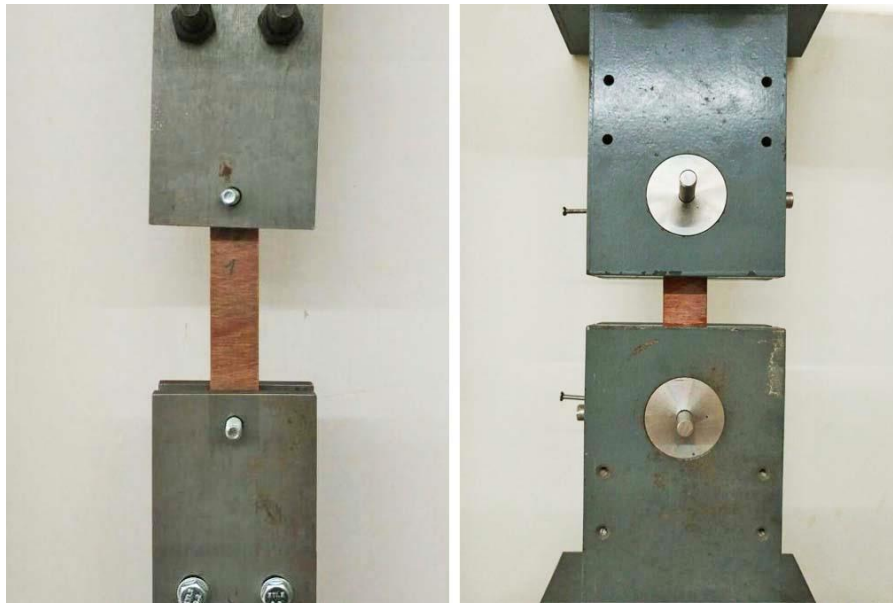


Abbildung 243: Lochleibungsversuche an Gewindeschrauben (links) und an glatten Bolzen (rechts) in KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q

Anhand von Lochleibungszugversuchen wurde der Einfluss der Beschaffenheit der Manteloberfläche des Verbindungsmittels bestimmt. Als Verbindungsmittel kamen Gewindeschrauben (8.8 blank, Gewindegangsteigung 1,0 mm) und glatte Bolzen (Material: 16MnCr5) mit $d = 8 \text{ mm}$ in KP BE 335-1 50 % L / 50 % Q zum Einsatz. Die Stärke der Prüfkörper betrug 10 mm, die Randabstände lagen bei $a_3 = 2,5 d$ und $a_4 = 1,5 d$. Die Versuche fanden bei ca. 20°C im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 50 \text{ kN}$ statt. Die Zugprüfungen wurden mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt; die Prüfgeschwindigkeiten wurden so gewählt, dass der Bruch nach ca. 300 Sekunden eintrat. Dokumentiert wurden Kraft- und Wegveränderungen. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet.

Die für die Lochleibungsprüfung eingesetzten glattschaftigen Verbindungsmittel waren aus Stahl S355 mit einer Zugfestigkeit $f_u = 510 \text{ N/mm}^2$; die Schrauben aus Festigkeitsklasse 8.8 mit einer Zugfestigkeit von $f_u = 800 \text{ N/mm}^2$. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 61, S. A-105 aufgeführt.

3.5.1.4 Lochleibungsversuche an Zangenanschlüssen

An Zangenverbindungen an KP-Querschnitten (Dehonit BE 335-1 50 % L / 50 % Q) wurde der Einfluss der Bolzenschlankheit auf die Tragfähigkeit der Verbindung bestimmt. In Abbildung 244 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Über eine hochfeste Schraube M8 8.8 werden die Kräfte von den KP - Querschnitten auf das Knotenblech übertragen. Die Randabstände sind in allen Versuchen gleich gewählt und betragen $a_4 = 1,5 \times d$ und $a_3 = 2,5 \times d$. Die Stärke der Laschen wurde von 1,0 cm auf 2,0 cm und auf 3,0 cm gesteigert, sodass sich Bolzenschlankheiten von $\lambda = 1,25$; 2,5 und 3,75 einstellen. Die Lage der Schraube wurde jeweils durch zwei Unterlegscheiben und durch eine Mutter gesichert. Die Mutter wurde ohne Schraubenschlüssel per Hand angezogen.

Die Versuche fanden im T-Lab der TU Kaiserslautern an einem Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\max} = 50 \text{ kN}$ statt. Die Zugprüfungen wurden mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt; die Geschwindigkeiten wurden so gewählt, dass der Bruch nach ca. 300 Sekunden eintrat. Die Messdaten wurden über Doli Test&Motion erfasst und mittels der Programme Minitab17 und Excel2013 ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 62, S. A-106 aufgeführt.

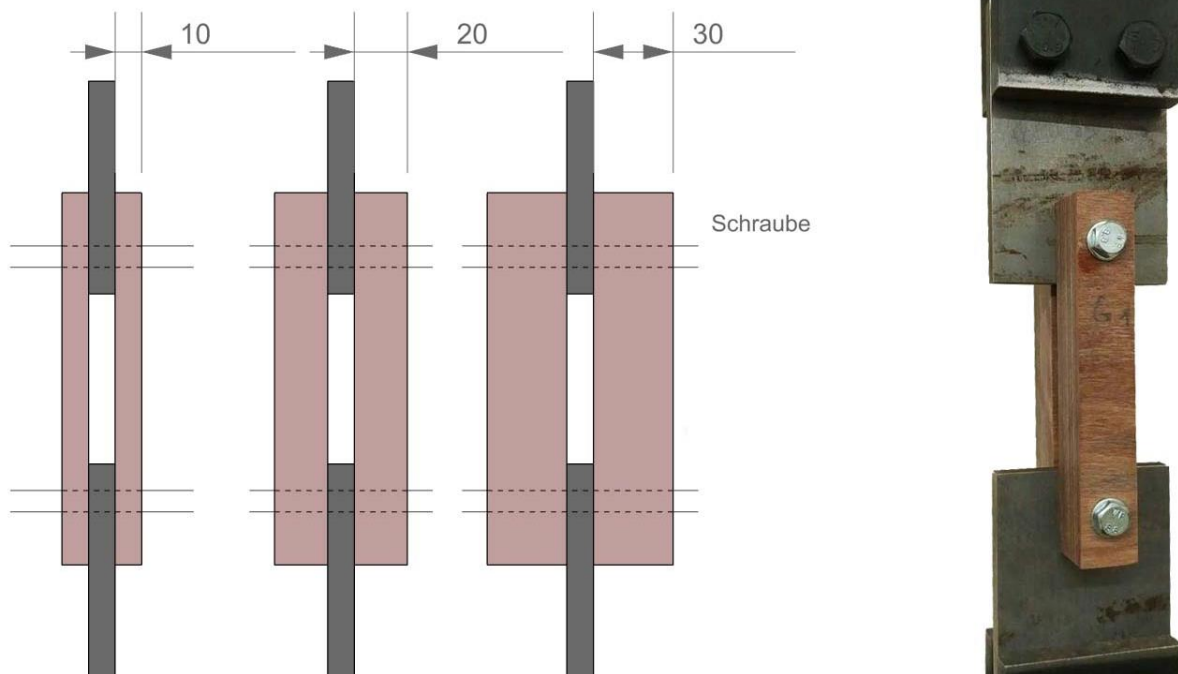
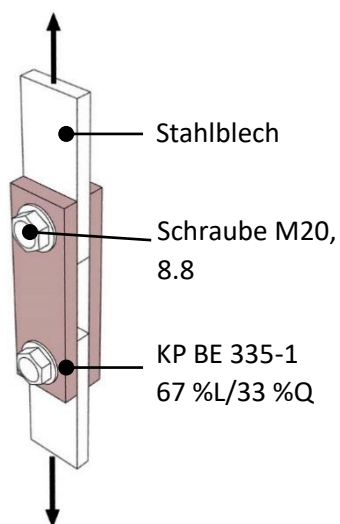


Abbildung 244: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Schlankheitseffektes

3.6 Versuche an gleitfesten Verbindungen in Anlehnung an DIN EN 408 (2012)

3.6.1 Hochfeste Schraube M20, Festigkeit 8.8



Es wurden Untersuchungen zum Tragverhalten von Zangenanschlüssen aus KP (BE 335-1, 67 % L / 33 % Q) an ein mittiges Stahlblech mit Stahlschrauben M20, 8.8 (Unterlegscheibe M20, Randabstand $a_3 = 2,0 \times d$, $a_4 = 1,5 \times d$ und $t = 15 \text{ mm}$) gemäß Abbildung 245 durchgeführt. Zwei Querschnitte aus KP wurden an beiden Enden mit jeweils einer Schraube mit einem mittigen Stahlblech verbunden. Die Schraubenvorspannung wurde über einen Drehmomentschlüssel aufgebracht. Über die Stahlbleche wurden die Prüfkörper in die Prüfmaschine eingespannt.

Abbildung 245: Versuchsskizze

Prüfung und Dokumentation

Der Versuch gliederte sich in die nachfolgenden Teilversuche:

- | | |
|---------------------------|---|
| (1) Doppelstab aus Fichte | – Schraube nicht vorgespannt |
| (2) Doppelstab aus KP | – Schraube nicht vorgespannt |
| (3) Doppelstab aus KP | – Schraube vorgespannt |
| (4) Doppelstab aus KP | – Schraube vorgespannt + Unterlegscheibe aus Sandpapier |



Abbildung 246: Varianten im Zugversuch. Links: (1) Doppelstab Fichte ohne Vorspannung. Mitte: (2) und (3) Doppelstab KP mit / ohne Vorspannung. Rechts: (4) Doppelstab KP mit Vorspannung und Unterlegscheiben aus Sandpapier

Für die Versuche (3) und (4) wurden die Schrauben ($\mu_{\text{ges.}} = 0,14$) mit einem Drehmoment M_A^{66} von 464 Nm vorgespannt, was einer Vorspannkraft von 127 kN entspricht. Als Unterlegscheiben (M20 $d_A = 37$ mm; $d_i = 21$ mm, $t = 3$ mm) kamen hochfeste Scheiben mit einer Scheibenfläche $A = 729 \text{ mm}^2$ zum Einsatz. Die Druckspannung auf das KP unter der Unterlegscheibe lag bei $\sigma = 127.000 \text{ N} / 729 \text{ mm}^2 = 174 \text{ N/mm}^2$ und entsprach damit etwa 76 % der Druckfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q.

Für die Versuche (4) wurden unter die Stahlscheiben und in die Scherflächen zwischen Stahlblech und KP Unterlegscheiben aus Sandpapier mit 120-er Körnung gelegt um die Reibung zwischen den Scherflächen zu vergrößern. Die nativen Holzquerschnitte im Versuch (1) wurden im Vorfeld der Prüfung unter Normalklima gelagert.

Die Prüfungen fanden an einen Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\text{max}} = 200 \text{ kN}$ in Geb. 60 der TU Kaiserslautern statt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug ca. 1 mm/min. Es wurden Kraft, Weg und Zeit mit einem Universalmessverstärker (HBM Quantum) erfasst. Die Daten wurden mittels der Programme Excel und Minitab17 ausgewertet. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 63, S. A-107 aufgeführt.

⁶⁶ Anziehdrehmoment für metrische Schrauben bei 90 %-iger Ausnutzung der 0,2 % Dehngrenze nach Angabe des Schraubenherstellers.

3.6.2 Hochfeste Schraube M8, Festigkeit 8.8

Es wurden Untersuchungen zum Tragverhalten von Zangenanschlüssen aus KP (BE 335-1, 67 % L / 33 % Q) unter Verwendung vorgespannter, hochfester Schrauben M8; 8.8 durchgeführt. Dazu wurden Prüfkörper gemäß Abbildung 247 hergestellt.



Abbildung 247: Prüfkörper zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit vorgespannter Schrauben in Bauteilanschlüssen aus KP

Zwei Querschnitte aus KP (BE 335-1, 67 % L / 33 % Q) wurden mittels hochfester Schrauben M8, 8.8 sowie hochfester Unterlegscheiben und Muttern an zwei Stahlbleche befestigt, die wiederum in eine Prüfmaschine eingespannt werden konnten. Als Randabstand der Bohrungen in den KP-Querschnitte wurde $a_3 = 2,5 \times d$ und $a_4 = 1,5 \times d$ gewählt. Es wurden sowohl Versuche ohne Schraubenvorspannung als auch Versuche mit Schraubenvorspannung durchgeführt.

Das KP wurde im Vorfeld der Prüfungen über mehrere Monate hinweg in einem Kellerraum bei ca. 15 °C und einer relativen Luftfeuchte von 60 % bis 70 % gelagert. Die erforderliche Vorspannkraft von 18,1 kN wurde mittels Drehmomentschlüssel auf die Schraube aufgebracht. In den Versuchen wurde zum einen der Effekt der Schraubenvorspannung auf die Tragfähigkeit im Vergleich zu nicht vorgespannten Schrauben untersucht. Zum anderen wurden Kriecheffekte untersucht, indem vorgespannte Proben unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft, 35 Tagen nach Aufbringen der Vorspannkraft und 105 Tagen nach Aufbringen der Vorspannkraft geprüft wurden. Die Proben, die nicht unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft geprüft wurden, wurden bis zur Prüfung im Normalklima gelagert. Die Oberflächen der Stahlbleche und der KP - Querschnitte wurden im Vorfeld der Prüfung weder gereinigt, noch anderweitig bearbeitet.

Prüfung und Dokumentation

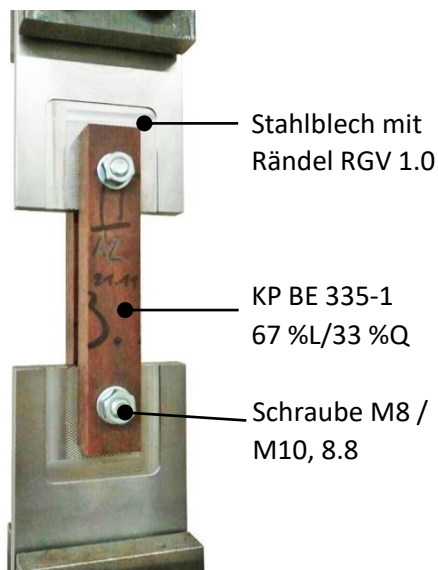
Im Vorfeld der Prüfungen wurden Prüfkörper markiert, die Schichtfehler im Bereich der Bohrung aufwiesen (vgl. Abbildung 247 rechts, rechter KP-Querschnitt, oben). Für jede Prüfreihe standen 5 bis 6 Prüfkörper zur Verfügung.

Die Schrauben ($\mu_{\text{ges.}} = 0,14$) wurden mit einem Drehmoment M_A^{67} von 27,3 Nm vorgespannt, was einer Vorspannkraft von 18,1 kN entspricht. Als Unterlegscheiben (M8 $d_A = 16$ mm; $d_i = 8,4$ mm, $t = 1,6$ mm) kamen hochfeste Scheiben mit einer Scheibenfläche $A = 146$ mm² zum Einsatz. Die Druckspannung auf das KP unter der Unterlegscheibe lag bei $\sigma = 18.100$ N / 146 mm² = 124 N/mm² und entsprach etwa 54 % der Druckfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q.

Die Zugprüfungen fanden auf einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\text{max}} = 50$ kN statt. Die Prüfkörper wurden über die Stahlplatten in die Prüfmaschine eingehängt und auf Zug belastet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min. Es wurden Kraft, Weg und Zeit mittels der Software Doli Test&Motion erfasst. Prüfkörper mit Schichtfehlern sind in den Prüfprotokollen aufgeführt, gehen jedoch nicht in die Berechnung des Mittelwertes und des charakteristischen Festigkeitskennwertes mit ein. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 64, S. A-108 dargestellt.

3.6.3 Hochfeste Schraube M8 / M10, Festigkeit 8.8 auf gerändelter Oberfläche

Es wurden Untersuchungen zum Tragverhalten von Zangenanschlüssen aus KP (BE 335-1, 67 % L / 33 % Q) unter Verwendung vorgespannter, hochfester Schrauben M8; 8.8 an ein gerändeltes Stahlblech (RGV 1.0 DIN 82) durchgeführt. Dazu wurden Prüfkörper gemäß Abbildung 248 hergestellt. Zwei Querschnitte aus KP (BE 335-1, 67 % L / 33 % Q) wurden mittels hochfester Schrauben M8, 8.8 sowie hochfester Unterlegscheiben und Muttern an zwei Stahlbleche mit gerändelter Oberfläche befestigt, die in eine Prüfmaschine eingespannt werden konnten. Als Randabstand der Bohrungen in den KP-Querschnitten wurde $a_3 = 2,5 \times d$ und $a_4 = 1,5 \times d$ gewählt.



In den Versuchen wurde zum einen der Effekt der Schraubenvorspannung unter der Verwendung gerändelter Mittelbleche auf die Tragfähigkeit im Vergleich zu nicht vorgespannten Schrauben untersucht. Zum anderen wurden Kriecheffekte untersucht, indem vorgespannte Proben unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft, 35 Tagen nach Aufbringen der Vorspannkraft und 105 Tagen nach Aufbringen der Vorspannkraft geprüft wurden. Die Proben, die nicht unmittelbar nach dem Aufbringen der Vorspannkraft einer Prüfung unterzogen wurden, wurden bis zur Versuchsdurchführung im Normalklima gelagert.

Abbildung 248: Auf Flächenrändel vorgespannte KP-Zange

⁶⁷ Anziehdrehmoment für metrische Schrauben bei 90 %-iger Ausnutzung der 0,2 % Dehngrenze nach Angabe des Schraubenherstellers

Prüfung und Dokumentation

Die Schrauben ($\mu_{\text{ges.}} = 0,14$) wurden mit einem Drehmoment M_A von 27,3 Nm (M8) bzw. 54 Nm (M10) vorgespannt, was einer Vorspannkraft von 18,1 kN (M8) bzw. 28,8 kN (M10) entspricht. Als Unterlegscheiben (M8: $d_A = 16$ mm; $d_i = 8,4$ mm, $t = 1,6$ mm / M10: $d_A = 20$ mm; $d_i = 10,5$ mm, $t = 2$ mm) kamen hochfeste Scheiben mit einer Scheibenfläche $A = 146$ mm² bzw. 228 mm² zum Einsatz. Die Druckspannung auf das KP unter der Unterlegscheibe M8 lag bei $\sigma = 18.100 \text{ N} / 146 \text{ mm}^2 = 124 \text{ N/mm}^2$ und entsprach etwa 54 % der Druckfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q. Die Druckspannung auf das KP unter der Unterlegscheibe M10 lag bei $\sigma = 28.800 \text{ N} / 228 \text{ mm}^2 = 127 \text{ N/mm}^2$ und entsprach etwa 55 % der Druckfestigkeit von KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q. Die Zugprüfungen fanden auf einem Weg-gesteuerten Zweisäulenprüfrahmen mit $F_{\text{max}} = 50$ kN statt. Die Prüfkörper wurden über die Stahlplatten in die Prüfmaschine eingehängt und auf Zug belastet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 0,5 mm/min. Es wurden Kraft, Weg und Zeit mittels der Software Doli Test&Motion erfasst. Prüfkörper mit Schichtfehlern sind in den Prüfprotokollen aufgeführt, gehen jedoch nicht in die Berechnung des Mittelwertes und des charakteristischen Festigkeitskennwertes mit ein. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Prüfprotokoll 65, S. A-109 bis Prüfprotokoll 67, S. A-111 aufgeführt.

3.7 Bauteilversuche in Anlehnung an DIN EN 408 (2012)

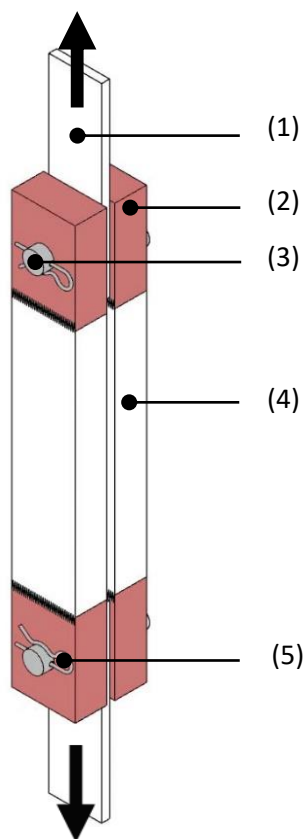


Abbildung 249: Skizze Versuch

Es wurden Bauteilversuche im Maßstab 1:1 an Zangenanschlüssen von mit KP verstärkten Stabpaaren durchgeführt. Die Versuche fanden in Gebäude 60 der Technischen Universität Kaiserslautern an einem Weg-gesteuerten 4-Säulenprüfrahmen mit $F_{\text{max}} = 600$ kN – in Anlehnung an DIN EN 408 (2012) – statt. Dazu wurden die Stabenden $b = 120$ mm, $h = 60$ mm aus nativem Nadelholz mit KP BE 335-1 67 % L / 33 % Q verstärkt (vgl. Abbildung 249 (2)). Eine visuelle Begutachtung des nativen Holzes (vgl. Abbildung 249 (4)) führte zu einer Einstufung in die Sortierklassen S10 und S13, respektive in die Festigkeitsklassen C24 und C30. Die verstärkten Stäbe wurden bis zur Prüfung im Klimaschrank unter Normalklima gelagert. Mittels hydraulischer Einspannpacken wurden die Knotenbleche (vgl. Abbildung 249 (1)) in der Prüfvorrichtung gehalten. Mit einem Bolzen $d = 40$ mm (Stahl 16MnCr5) (vgl. Abbildung 249 (3)) wurden jeweils zwei verstärkte Stäbe an die Knotenbleche unter den Randabständen $a_4 = 1,5 \times d$ und $a_3 = 2,5 \times d$ angeschlossen. Die Lage der Bolzen wurde mittels Federstecker (vgl. Abbildung 249 (5)) gesichert. Die Prüfung wurde als Zugversuch durchgeführt. Dabei wurde die Prüfgeschwindigkeit so gewählt, dass der Bruch nach ca. 300 Sekunden eintrat. Im Rahmen der Prüfung wurden Kraft- und Wegveränderungen mit dem Datenerfassungssystem HBM Quantum festgehalten. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im Prüfprotokoll 68, S. A-112 aufgeführt.

4 Prüfprotokolle

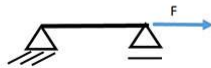
Prüfprotokoll 1: W4/Delam.

Prüfprotokoll zu Reihe W4/Delam.					
Thema	Klebstoffprüfung				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
10.12.2016	Forschungsprojekt Deho	Delamination	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Einkochautomat	20°C / 85%	KZV I-15 *	DIN EN 301 **	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Fugenöffnung	mittel	max
H ₂ O, 1h, 20°C	H ₂ O, 6h, 100°C	Deutsche Holzveredelung		7,7%	14,3%

*BAKELITE PF 0283 HL + BAKELITE PFH 018

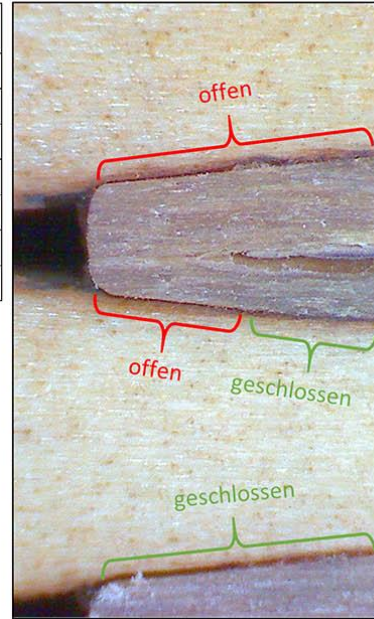
** in Anlehnung

System



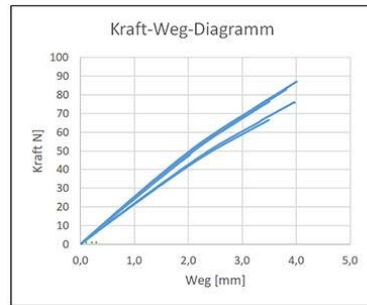
Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$



Parameter											
n	Prüfkörper		u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Fugen	offene Fugen	Fugenöffnung			
1	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	0,5	2%			
2	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	2,5	12%			
3	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	3,0	14%			
4	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	2,0	10%			
5	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	0,5	2%			
6	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	0,5	2%			
7	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	3,0	14%			
8	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	1,0	5%			
9	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	1,0	5%			
10	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	0,5	2%			
11	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	1,0	5%			
12	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	2,0	10%			
13	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	2,0	10%			
14	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	3,0	14%			
15	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	3,0	14%			
16	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	1,0	5%			
17	KP	Fichte	18,0	15,20	40,00	21	1,0	5%			
18											
19											
20											
21											

Prüfprotokoll zu Reihe G					
Thema	Zugfestigkeit KP				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
12.01.2016	Deho	Zugversuch	KP BE 335-1 67%L/33%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Halle 60	20°C / 65%			DIN 52188** DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t, mean}$ ***	$f_{t, k}$ ***	Emean
25% Lastabf..	1,8 mm/min	DR	99,4	72,9	17275



System

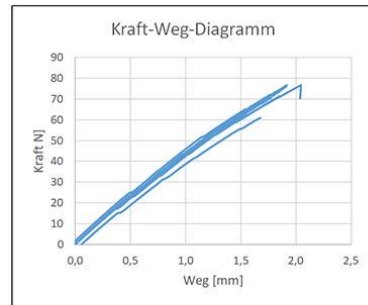
Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$



Parameter											
n	Prüfkörper	Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Sonstiges
1	Kunstharzpressholz	117,7	18077	50,00	15,00	147	Fehlstelle in Querlage	1,80	1,20	G2	
2	Kunstharzpressholz	102,9		50,00	15,00	127	Überlappung in Querlage	1,80	0,70	G3	
3	Kunstharzpressholz	65,2	16200	50,00	15,00	76	2 Überlappungen in Querlage	1,80	0,80	G4	
4	Kunstharzpressholz	106,7	18203	50,00	15,00	132	Überlappung in Querlage	1,80	0,60	G5	
5	Kunstharzpressholz	106,0	17917	50,00	15,00	138	Fehlstelle in Querlage	1,80	0,20	G6	
6	Kunstharzpressholz	93,6	18829	50,00	15,00	113	Überlappung in Querlage	1,80	0,60	G7	
7	Kunstharzpressholz	107,3	17860	50,00	15,00	136	Überlappung in Querlage	1,80	0,40	G8	
8	Kunstharzpressholz	100,0	17870	50,00	15,00	124	Überlappung in Querlage	1,80	0,30	G9	
9	Kunstharzpressholz	111,4	17775	50,00	15,00	140	Fehlstelle in Querlage	1,80	0,60	G10	
10	Kunstharzpressholz	102,2	16377	50,00	15,00	146	Fehlstelle in Querlage	1,80	0,60	G11	
11	Kunstharzpressholz	89,4	15933	50,00	15,00	130	Überlappung in Querlage	1,80	0,40	G12	
12	Kunstharzpressholz	101,8	14983	50,00	15,00	121	Überlappung in Querlage	1,80	1,40	G13	
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

Prüfprotokoll zu Reihe H					
Thema	Zugfestigkeit KP				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
31.05.2016	Deho	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Halle 60	20°C / 65%	Fehlerfrei		DIN 52188** DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t,mean}$ ***	$f_{t,k}$ ***	Emean
25% Lastabf..	1,8 mm/min	DR	118,7	94,0	



System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



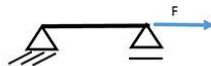
Parameter											
n	Prüfkörper	Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Sonstiges
1	Kunstharzpressholz	131,2		40,00	15,00	135		1,80	2,00	H1	
2	Kunstharzpressholz	104,8		40,00	15,00	103		1,80	1,90	H2	
3	Kunstharzpressholz	129,9		40,00	15,00	126		1,80	1,20	H3	
4	Kunstharzpressholz	121,5		40,00	15,00	124		1,80	0,70	H4	
5	Kunstharzpressholz	124,7		40,00	15,00	125		1,80	1,20	H5	
6	Kunstharzpressholz	117,9		40,00	15,00	118		1,80	1,20	H6	
7	Kunstharzpressholz	120,9		40,00	15,00	126		1,80	1,10	H7	
8	Kunstharzpressholz	119,0		40,00	15,00	121		1,80	1,40	H8	
9	Kunstharzpressholz	120,0		40,00	15,00	127		1,80	1,30	H9	
10	Kunstharzpressholz	128,3		40,00	15,00	138		1,80	1,10	H10	
11	Kunstharzpressholz	87,3		40,00	15,00	95	Fehlstelle Überlappung QL	1,80	1,20	H11	
12	Kunstharzpressholz	127,2		40,00	15,00	138		1,80	0,90	H12	
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

Prüfprotokoll zu Reihe I						
Thema	Zugfestigkeit KP					
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer	
31.05.2016	Deho	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q		DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm	
Weg	Halle 60	20°C / 65%	Fehlertyp Überlappung		DIN 52188** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t,mean}$ ***		$f_{t,k}$ ***	
25% Lastabf..	1,8 mm/min	DR	1 Fehler		101,0	
			2 Fehler		38,1	
					72,4	
					29,1	

*** ermittelt nach
DIN EN 1058

** in
Anlehnung

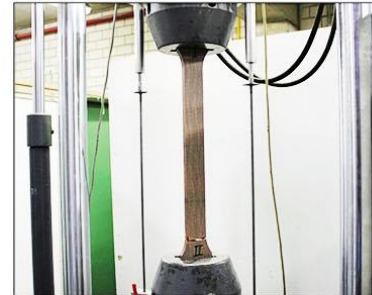
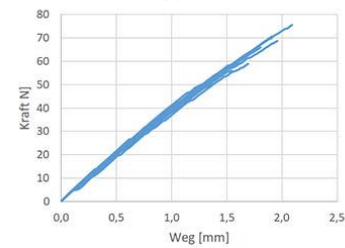
System



Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

Kraft-Weg-Diagramm



Parameter

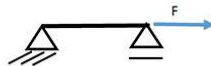
n	Prüfkörper	Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Fehleranzahl	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Sonstiges
1	Kunstharzpressholz	119,6		40,00	15,00	145	1	1,80	1,10	I1	
2	Kunstharzpressholz	35,7		40,00	15,00	39	2	1,80	1,10	I2	
3	Kunstharzpressholz	38,6		40,00	15,00	48	2	1,80	0,70	I3	
4	Kunstharzpressholz	33,4		40,00	15,00	44	2	1,80	0,70	I4	
5	Kunstharzpressholz	47,0		40,00	15,00	59	2	1,80	0,90	I5	
6	Kunstharzpressholz	110,9		40,00	15,00	130	1	1,80	0,60	I6	
7	Kunstharzpressholz	94,6		40,00	15,00	110	1	1,80	0,70	I7	
8	Kunstharzpressholz	83,7		40,00	15,00	91	1	1,80	0,70	I8	
9	Kunstharzpressholz	127,1		40,00	15,00	145	1	1,80	0,70	I9	
10	Kunstharzpressholz	97,6		40,00	15,00	114	1	1,80	0,80	I10	
11	Kunstharzpressholz	85,4		40,00	15,00	99	1	1,80	0,80	I11	
12	Kunstharzpressholz	114,1		40,00	15,00	130	1	1,80	0,60	I12	
13	Kunstharzpressholz	73,9		40,00	15,00	86	1	1,80	0,7	I13	
14	Kunstharzpressholz	105,4		40,00	15,00	122	1	1,80	0,7	I14	
15	Kunstharzpressholz	36,9		40,00	15,00	48	2	1,80	1,0	I15	
16	Kunstharzpressholz	38,5		40,00	15,00	43	2	1,80	1,0	I16	
17	Kunstharzpressholz	99,1		40,00	15,00	117	1	1,80	0,5	I17	
18	Kunstharzpressholz	115,5		40,00	15,00	134	1	1,80	0,6	I18	
19											
20											

Prüfprotokoll zu Reihe J					
Thema	Zugfestigkeit KP				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
31.05.2016	Deho	Zugversuch	KP BE 335-1 67%L/33%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Halle 60	20°C / 65%	Fehlertyp Fehlstelle		DIN 52188** DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t,mean}$ ***	$f_{t,k}$ ***	Emean
25% Lastabf..	1,8 mm/min	DR	1 Fehler	123,4	110,3
			2 Fehler	112,2	98,5

*** ermittelt nach
DIN EN 1058

** in
Anlehnung

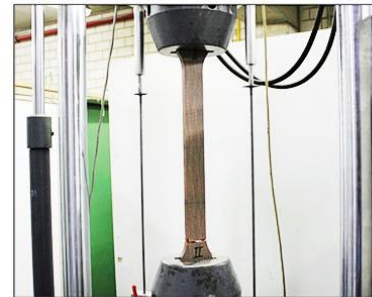
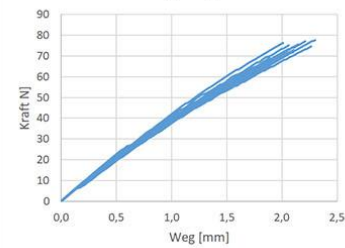
System



Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

Kraft-Weg-Diagramm



Parameter											
n	Prüfkörper	Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Fehleranzahl	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Sonstiges
1	Kunstharzpressholz	128,4		40,00	15,00	132	1	1,80	1,40	I1	
2	Kunstharzpressholz	107,6		40,00	15,00	110	1	1,80	1,80	I2	
3	Kunstharzpressholz	127,9		40,00	15,00	142	1	1,80	0,40	I3	
4	Kunstharzpressholz	126,3		40,00	15,00	145	1	1,80	1,10	I4	
5	Kunstharzpressholz	121,2		40,00	15,00	134	1	1,80	1,00	I5	
6	Kunstharzpressholz	131,3		40,00	15,00	149	1	1,80	1,10	I6	
7	Kunstharzpressholz	130,2		40,00	15,00	143	1	1,80	1,00	I7	
8	Kunstharzpressholz	120,9		40,00	15,00	137	1	1,80	0,90	I8	
9	Kunstharzpressholz	126,8		40,00	15,00	138	1	1,80	1,20	I9	
10	Kunstharzpressholz	117,3		40,00	15,00	131	1	1,80	1,20	I10	
11	Kunstharzpressholz	122,8		40,00	15,00	140	1	1,80	1,10	I11	
12	Kunstharzpressholz	122,5		40,00	15,00	142	1	1,80	1,00	I12	
13	Kunstharzpressholz	109,1		40,00	15,00	123	2	1,80	1,1	I13	
14	Kunstharzpressholz	111,6		40,00	15,00	130	2	1,80	1,0	I14	
15	Kunstharzpressholz	123,4		40,00	15,00	149	2	1,80	1,1	I15	
16	Kunstharzpressholz	115,8		40,00	15,00	136	2	1,80	0,9	I16	
17	Kunstharzpressholz	107,8		40,00	15,00	135	2	1,80	0,9	I17	
18	Kunstharzpressholz	106,1		40,00	15,00	131	2	1,80	0,7	I18	
19											
20											

Prüfprotokoll zu Reihe S					
Thema	Schäftungsfestigkeit Fichte + KP,1/10, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
15.01 / 06.02 & 30.04.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%	Verkleb. u ≈12%; Prüf. u ≈12%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{l,mittel} **	f _{t,k} **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	46,8	16,9	-

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

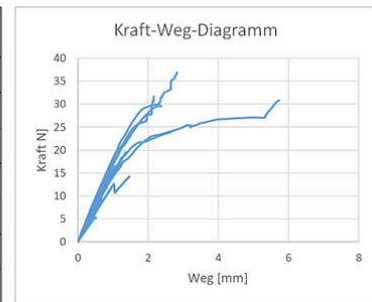
** ermittelt nach DIN EN 1058

*** in Anlehnung



Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	61,1	9,3	10,00	39,80	171	Fuge	1,00	0,1	S1	-
2	KP	Fichte	77,8	8,0	10,00	39,80	351	Fuge	1,00	0,1	S2	-
3	KP	Fichte	93,6	7,8	10,00	39,80	175	Fuge	1,00	0,3	S3	-
4												
5	KP	Fichte	36,5	7,8	10,00	39,80	94	Fuge	1,00	0,3	S5	-
6	KP	Fichte	74,9	7,6	10,00	39,80	155	Fuge	1,00	0,2	S6	-
7	KP	Fichte	24,3	7,7	10,00	39,80	51	Fuge	1,00	0,2	S7	-
8	KP	Fichte	49,4	8,1	10,00	39,80	88	Fuge	1,00	0,1	S8	-
9	KP	Fichte	43,3	8,0	10,00	39,80	83	Fuge	1,00	0,1	S9	-
10	KP	Fichte	33,3	8,1	10,00	39,80	56	Fuge	1,00	0,3	S10	-
11	KP	Fichte	36,3	8,3	10,00	39,80	65	Fuge	1,00	0,3	S11	-
12	KP	Fichte	13,8	7,9	10,00	39,80	39	Fuge	1,00	0,1	S12	-
13	KP	Fichte	80,3	7,6	10,00	39,80	138	Fuge	1,00	0,3	S13	-
14	KP	Fichte	42,2	7,7	10,00	39,80	69	Fuge	1,00	0,3	S14	-
15	KP	Fichte	51,9	8,0	10,00	39,80	85	Fuge	1,00	0,2	S15	-
16	KP	Fichte	29,4	11,7	10,00	39,80	64	Fuge	1,00	0,00	S16	-
17	KP	Fichte	81,1	11,2	10,00	39,80	153	Fuge	1,00	0,00	S17	-
18	KP	Fichte	30,0	11,3	10,00	39,80	54	Fuge	1,00	0,10	S18	-
19	KP	Fichte	86,3	11,1	10,00	39,80	198	Fuge	1,00	0,00	S19	-
20												

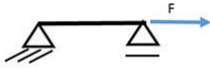
**** ermittelt mit Gann Einschlagelektrode

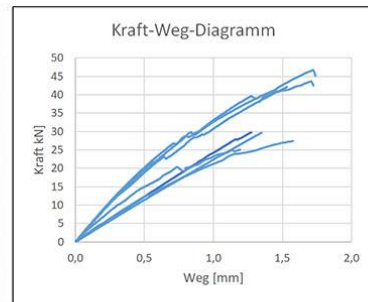
Prüfprotokoll Reihe B					
Thema	Referenzmessung Keilzinkenfestigkeit Fichte, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
21.01.2016 & 28.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 100%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,1,mittel} **	f _{t,1,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,9 mm/min	Deutsche Holzveredelung	53,0	33,0	

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul E [N/mm²]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Geschw. v [mm/min]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung
1	Fichte	Fichte	33,7		15,00	50,00	84	1	0,90	0,4	B2
2	Fichte	Fichte	40,6		15,00	50,00	86	1	0,90	0,7	B3
3	Fichte	Fichte	40,1		15,00	50,00	92	1	0,90	0,4	B4
4	Fichte	Fichte	59,8		15,00	50,00	112	3	0,90	1,2	B5
5	Fichte	Fichte	52,3		15,00	50,00	91	3	0,90	1,2	B6
6	Fichte	Fichte	60,5		15,00	50,00	117	3	0,90	0,4	B7
7	Fichte	Fichte	37,4		15,00	50,00	113	1	0,90	0,6	B8
8	Fichte	Fichte	57,3		15,00	50,00	110	3	0,90	0,8	B9
9	Fichte	Fichte	62,6		15,00	50,00	131	3	0,90	0,2	B10
10	Fichte	Fichte	50,9		15,00	50,00	140	3	0,90	0,2	B12
11	Fichte	Fichte	34,0		15,00	50,00	76	3	0,90	0,4	B13
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

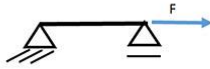
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenschering
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

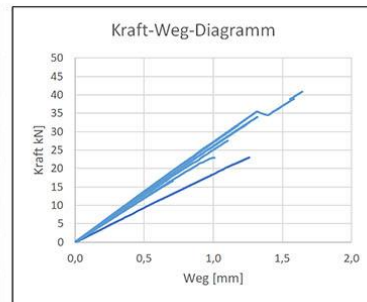
Prüfprotokoll zu Reihe B1					
Thema	Referenzmessung Keilzinkenfestigkeit Fichte, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
15.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 75%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{cl,mittel} **	f _{cl,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,9 mm/min	Deutsche Holzveredelung	43,9	27,9	

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul E [N/mm²]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Geschw. v [mm/min]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung
1	Fichte	Fichte	43,1		15,00	50,00	92	3	0,90	1,70	B1.1
2	Fichte	Fichte	31,5		15,00	50,00	85	4	0,90	0,60	B1.2
3	Fichte	Fichte	37,8		15,00	50,00	76	1	0,90	0,80	B1.3
4	Fichte	Fichte	43,4		15,00	50,00	135	1	0,90	0,80	B1.4
5	Fichte	Fichte	50,1		15,00	50,00	109	3	0,90	0,30	B1.5
6	Fichte	Fichte	36,9		15,00	50,00	81	4	0,90	0,40	B1.6
7	Fichte	Fichte	55,1		15,00	50,00	117	3	0,90	0,40	B1.7
8	Fichte	Fichte	22,5		15,00	50,00	55	1	0,90	0,30	B1.8
9	Fichte	Fichte	31,2		15,00	50,00	61	1	0,90	0,40	B1.9
10	Fichte	Fichte	52,2		15,00	50,00	102	1	0,90	0,80	B1.10
11	Fichte	Fichte	52,6		15,00	50,00	92	3	0,90	5,40	B1.11
12	Fichte	Fichte	42,9		15,00	50,00	97	3	0,90	0,30	B1.13
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

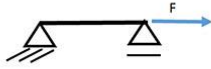
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

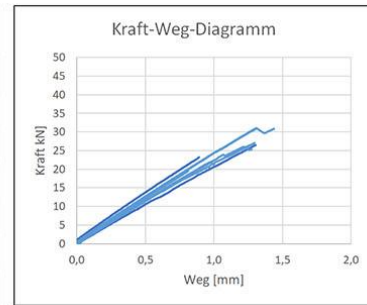
Prüfprotokoll zu Reihe B2					
Thema	Referenzmessung Keilzinkenfestigkeit Fichte, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 50%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{cl,mittel} **	f _{cl,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,9 mm/min	Deutsche Holzveredelung	37,1	28,6	

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul E [N/mm²]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Geschw. v [mm/min]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung
1	Fichte	Fichte	35,8	0	15,00	50,00	86	5	0,90	0,4	B2.1
2	Fichte	Fichte	31,9	0	15,00	50,00	61	2	0,90	0,7	B2.2
3	Fichte	Fichte	42,2	0	15,00	50,00	91	3	0,90	0,6	B2.3
4	Fichte	Fichte	36,7	0	15,00	50,00	83	5	0,90	0,5	B2.4
5	Fichte	Fichte	34,5	0	15,00	50,00	83	5	0,90	0,6	B2.5
6	Fichte	Fichte	36,1	0	15,00	50,00	80	1	0,90	1,3	B2.6
7	Fichte	Fichte	35,5	0	15,00	50,00	87	1	0,90	0,6	B2.7
8	Fichte	Fichte	42,4	0	15,00	50,00	85	2	0,90	0,8	B2.8
9	Fichte	Fichte	32,7	0	15,00	50,00	60	3	0,90	2,5	B2.10
10	Fichte	Fichte	42,7	0	15,00	50,00	100	3	0,90	0,7	B2.11
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

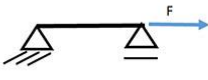
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

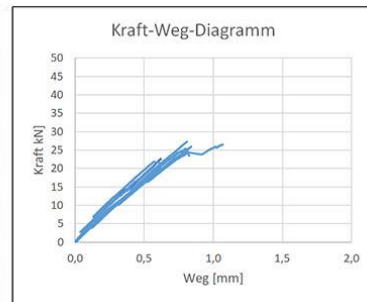
Prüfprotokoll zu Reihe B3					
Thema	Referenzmessung Keilzinkenfestigkeit Fichte, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 50%; V = 100%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,l,mittel} **	f _{t,l,k} **	p mittel
25% Lastabf..	variiert	Deutsche Holzveredelung	39,4	28,1	

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul E [N/mm²]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Geschw. v [mm/min]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung
1	Fichte	Fichte	50,1	0	15,00	50,00	81	3	2,5	0,5	B3.1
2	Fichte	Fichte	33,8	0	15,00	50,00	43	1	2,5	2,7	B3.2
3	Fichte	Fichte	37,1	0	15,00	50,00	63	4	2,5	1,3	B3.3
4	Fichte	Fichte	38,0	0	15,00	50,00	59	3	2,5	1,2	B3.4
5	Fichte	Fichte	40,8	0	15,00	50,00	58	4	2,5	1,4	B3.5
6	Fichte	Fichte	32,3	0	15,00	50,00	60	4	2,5	2,2	B3.6
7	Fichte	Fichte	40,1	0	15,00	50,00	57	3	2,5	4,1	B3.7
8	Fichte	Fichte	29,2	0	15,00	50,00	46	1	2,5	1,5	B3.8
9	Fichte	Fichte	34,9	0	15,00	50,00	60	1	2,5	1,8	B3.9
10	Fichte	Fichte	35,8	0	15,00	50,00	61	1	2,5	1,3	B3.10
11	Fichte	Fichte	34,1	0	15,00	50,00	64	1	2,5	1,0	B3.11
12	Fichte	Fichte	35,1	0	15,00	50,00	63	1	2,5	1,0	B3.13
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

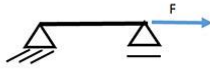
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

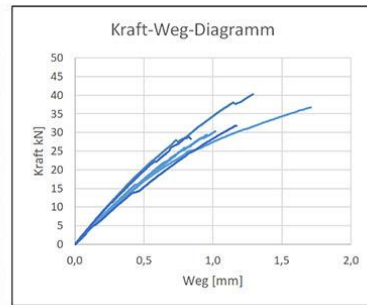
Prüfprotokoll zu Reihe B4					
Thema	Referenzmessung Keilzinkenfestigkeit Fichte, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 150%; V = 100%		DIN 52188*** DIN EN 408***
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{cl,mittel} **	f _{cl,k} **	p mittel
25% Lastabf..	variiert	Deutsche Holzveredelung	45,5	33,0	

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul E [N/mm²]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Geschw. v [mm/min]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung
1	Fichte	Fichte	54,4	0	15,00	50,00	104	3	2,5	0,5	B4.1
2	Fichte	Fichte	49,9	0	15,00	50,00	128	3	2,5	0,7	B4.2
3	Fichte	Fichte	41,6	0	15,00	50,00	77	3	2,5	0,8	B4.3
4	Fichte	Fichte	39,9	0	15,00	50,00	128	5	2,5	0,5	B4.4
5	Fichte	Fichte	43,3	0	15,00	50,00	96	5	2,5	0,6	B4.5
6	Fichte	Fichte	39,6	0	15,00	50,00	74	1	2,5	0,8	B4.6
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

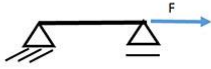
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

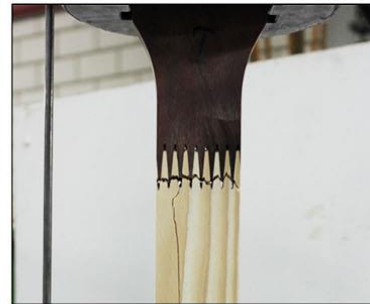
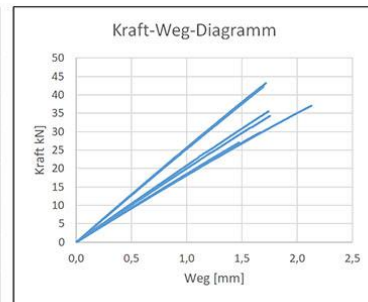
Prüfprotokoll zu Reihe C					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
13.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 100%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{cl,mittel} **	f _{cl,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,9 mm/min	Deutsche Holzveredelung	48,1	35,6	0,554

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Jahrringbreite [mm]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Faserabweichung [°]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	58,3	0,69	15,00	50,00	108	5	9	1,1	C2	0,60
2	KP	Fichte	40,9	3,19	15,00	50,00	107	2	20	0,9	C3	0,59
3	KP	Fichte	37,3	3,90	15,00	50,00	102	2	16	0,9	C4	0,46
4	KP	Fichte	47,8	2,70	15,00	50,00	119	3	22	0,3	C5	0,59
5	KP	Fichte	49,5	1,75	15,00	50,00	136	2	18	0,2	C6	0,47
6	KP	Fichte	42,3	5,15	15,00	50,00	112	5	14	0,3	C7	0,59
7	KP	Fichte	46,1	1,59	15,00	50,00	119	5	31	0,3	C8	0,56
8	KP	Fichte	49,8	1,79	15,00	50,00	142	2	21	0,3	C9	0,46
9	KP	Fichte	56,3	1,31	15,00	50,00	128	3	18	0,0	C10	0,63
10	KP	Fichte	47,2	1,73	15,00	50,00	115	4	15	1,2	C11	0,53
11	KP	Fichte	58,4	0,69	15,00	50,00	132	2	20	0,6	C12	0,61
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

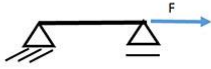
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

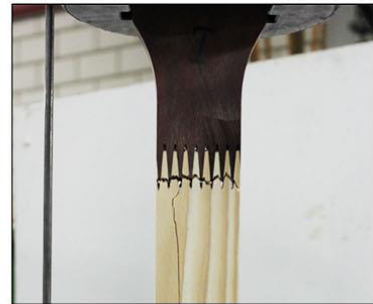
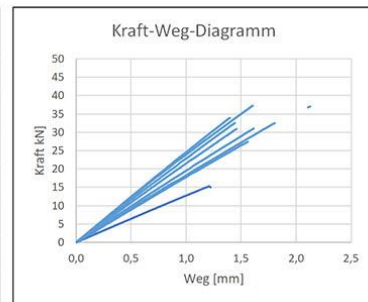
Prüfprotokoll zu Reihe C1					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
21.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 75%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,i,mittel} **	f _{t,i,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,85 mm/min	Deutsche Holzveredelung	42,3	34,4	0,509

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Jahrringbreite [mm]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Faserabweichung [°]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	37,0	1,94	15,00	50,00	101	2	15	0,7	C1.1	0,47
2	KP	Fichte	21,2		15,00	50,00	75	1		0,6	C1.2	
3	KP	Fichte	43,5	2,00	15,00	50,00	108	3	20	0,1	C1.3	0,56
4	KP	Fichte	37,4	2,28	15,00	50,00	105	5	20	0,6	C1.4	0,45
5	KP	Fichte	41,2	2,04	15,00	50,00	103	5	23	0,8	C1.5	0,46
6	KP	Fichte	37,8	3,15	15,00	50,00	109	5	18	0,7	C1.6	0,44
7	KP	Fichte	41,4	1,61	15,00	50,00	122	5	21	0,0	C1.7	0,51
8	KP	Fichte	50,1	2,04	15,00	50,00	124	3	12	0,3	C1.8	0,58
9	KP	Fichte	45,6	1,97	15,00	50,00	110	3	18	0,3	C1.9	0,57
10	KP	Fichte	47,7	1,71	15,00	50,00	120	3	13	0,2	C1.10	0,53
11	KP	Fichte	43,8	3,12	15,00	50,00	125	5	16	0,3	C1.12	0,52
12	KP	Fichte	41,7	1,60	15,00	50,00	110	3	20	0,3	C1.13	0,51
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

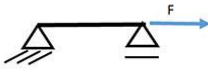
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

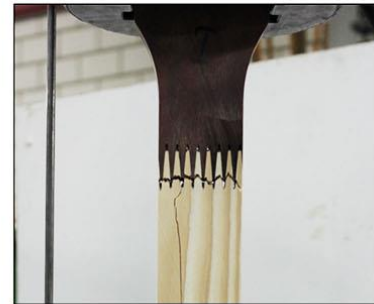
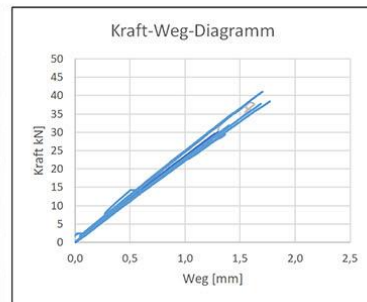
Prüfprotokoll zu Reihe C2					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
22.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 100%; V = 50%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{cl,mittel} **	f _{cl,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,85 mm/min	Deutsche Holzveredelung	48,9	39,2	0,538

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1, 6 und C2.10 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Jahringbreite [mm]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Faserab- weichung [°]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	51,6	1,33	15,00	50,00	101	3	20	0,4	C2.1	0,54
2	KP	Fichte	40,6	1,37	15,00	50,00	98	3	6	0,4	C2.2	0,51
3	KP	Fichte	50,2	1,23	15,00	50,00	115	3	20	0,8	C2.3	0,55
4	KP	Fichte	40,1		15,00	50,00	102	6	0	0,7	C2.4	
5	KP	Fichte	36,4		15,00	50,00	105	6	0	0,7	C2.5	
6	KP	Fichte	49,9	1,21	15,00	50,00	120	3	18	0,6	C2.6	0,52
7	KP	Fichte	51,8	0,95	15,00	50,00	123	2.1	8	0,4	C2.7	0,49
8	KP	Fichte	55,3	0,69	15,00	50,00	120	3	20	0,4	C2.8	0,60
9	KP	Fichte	43,3	1,17	15,00	50,00	99	3	8	0,6	C2.9	0,51
10	KP	Fichte	35,2	1,31	15,00	50,00	84	2.1	18	0,3	C2.10	0,60
11	KP	Fichte	50,3	1,45	15,00	50,00	121	3	20	0,0	C2.11	0,51
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

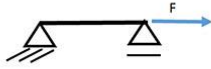
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt Fi
 2.1) KZV: Nettoquerschnitt KP
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

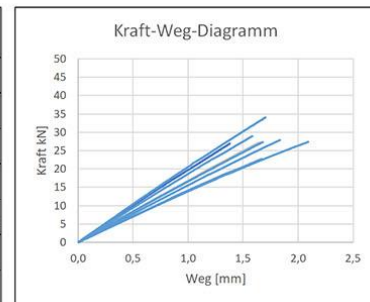
Prüfprotokoll zu Reihe C3					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
22.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 50%; V = 100%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,i,mittel} **	f _{t,i,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,85 mm/min	Deutsche Holzveredelung	38,8	31,8	0,493

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Jahrringbreite [mm]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Faserabweichung [°]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	36,5		15,00	50,00	119	1		0,1	C3.1	
2	KP	Fichte	36,1		15,00	50,00	104	1		0,1	C3.2	
3	KP	Fichte	45,4	2,21	15,00	50,00	121	5	14	0,0	C3.3	0,54
4	KP	Fichte	30,5		15,00	50,00	120	1		0,1	C3.4	
5	KP	Fichte	33,6		15,00	50,00	98	1		0,0	C3.5	
6	KP	Fichte	29,9		15,00	50,00	86	1		0,4	C3.6	
7	KP	Fichte	40,2	2,24	15,00	50,00	114	3	17	1,2	C3.7	0,50
8	KP	Fichte	38,1	3,42	15,00	50,00	121	2	13	0,7	C3.8	0,44
9	KP	Fichte	36,9	2,64	15,00	50,00	147	2	19	0,3	C3.10	0,52
10	KP	Fichte	35,9	2,02	15,00	50,00	103	3	22	0,8	C3.11	0,52
11	KP	Fichte	37,2	3,99	15,00	50,00	121	5	20	0,6	C3.12	0,45
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

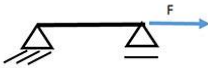
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

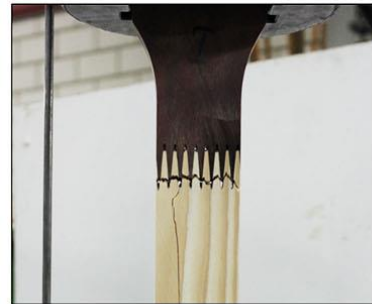
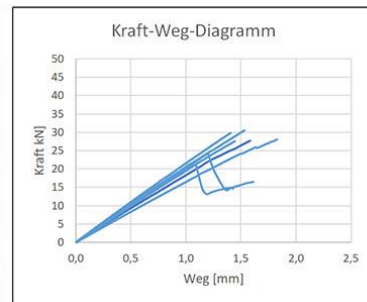
Prüfprotokoll zu Reihe C4					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
29.01.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	P = 150%; V = 100%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{u,mittel} **	f _{u,k} **	p mittel
25% Lastabf..	0,85 mm/min	Deutsche Holzveredelung	37,5	29,2	0,537

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Jahringbreite [mm]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Bruch	Faserab- weichung [°]	Vorspannung Einsp. [kN]	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	38,0		15,00	50,00	107	1		0,8	C4.1	
2	KP	Fichte	29,5		15,00	50,00	73	1		0,8	C4.2	
3	KP	Fichte	40,9	2,16	15,00	50,00	93	2	8	0,9	C4.3	0,52
4	KP	Fichte	30,0	5,09	15,00	50,00	77	6		0,4	C4.4	0,57
5	KP	Fichte	35,1	2,23	15,00	50,00	82	4	16	1,0	C4.6	0,53
6	KP	Fichte	33,4		15,00	50,00	85	1		0,8	C4.7	
7	KP	Fichte	32,7	2,70	15,00	50,00	85	2	22	0,3	C4.8	0,50
8	KP	Fichte	37,9	2,53	15,00	50,00	125	2	24	0,4	C4.9	0,51
9	KP	Fichte	41,6		15,00	50,00	112	1		0,7	C4.10	
10	KP	Fichte	41,5	3,24	15,00	50,00	117	2	22	0,4	C4.11	0,58
11	KP	Fichte	28,7		15,00	50,00	81	1		0,4	C4.12	
12	KP	Fichte	37,5		15,00	50,00	93	1		0,5	C4.13	
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

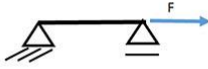
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenschierung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt
 6) KZV: Nettoquerschnitt
 infolge Holzvorschädigung

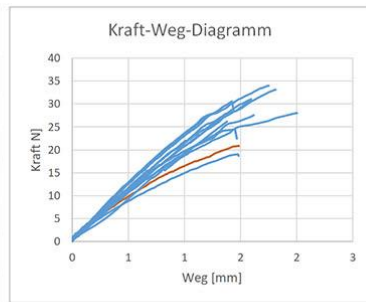
Prüfprotokoll zu Reihe O					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
03.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%	P = 10N/mm² ; V = 4,8 m/min	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{ti, mittel} **	f _{ti, k} **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	46,6	32,5	-

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]		b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdicke [g/cm³]
1	KP	Fichte	35,4		15,00	39,80	75	3	1,50	0,2	O1	
2	KP	Fichte	32,3		15,00	39,80	76	3	1,50	0,2	O2	
3	KP	Fichte	45,3		15,00	39,80	75	3	1,50	0,8	O3	
4	KP	Fichte	52,5		15,00	39,80	93	3	1,50	0,4	O4	
5	KP	Fichte	46,7		15,00	39,80	96	3	1,50	0,3	O5	
6	KP	Fichte	57,3		15,00	39,80	109	3	1,50	0,2	O6	
7	KP	Fichte	55,9		15,00	39,80	102	3	1,50	0,2	O7	
8	KP	Fichte	52,9		15,00	39,80	91	3	1,50	0,5	O9	
9	KP	Fichte	51,9		15,00	39,80	95	3	1,50	0,4	O10	
10	KP	Fichte	48,3		15,00	39,80	84	3	1,50	0,3	O11	
11	KP	Fichte	47,5		15,00	39,80	107	3	1,50	0,3	O12	
12	KP	Fichte	46,6		15,00	39,80	70	3	1,50	0,5	O13	
13	KP	Fichte	41,6		15,00	39,80	84	3	1,50	0,3	O14	
14								Bruchtyp 1) Holz, außerhalb KZV 2) KZV: Nettoquerschnitt 3) KZV: Klebfuge 4) KZV: Klebfuge; Flankenscherung 5) KZV: Klebfuge + Nettoquerschnitt				
15												
16												
17												
18												
19												
20												

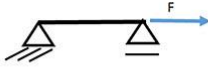
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt

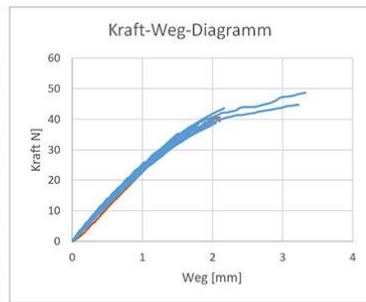
Prüfprotokoll zu Reihe N					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
03.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 45% (u~ 8%)	P = 10N/mm² ; V = 4,8 m/min	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,i,mittel} **	f _{t,i,k} **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	67,9	56,8	0,484

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]		b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	68,6		15,00	39,80	117	3	1,50	0,3	N1	0,48
2	KP	Fichte	65,3		15,00	39,80	127	5	1,50	0,3	N2	0,47
3	KP	Fichte	75,5		15,00	39,80	152	5	1,50	0,3	N3	0,53
4	KP	Fichte	59,6		15,00	39,80	103	3	1,50	0,2	N4	0,47
5	KP	Fichte	37,8		15,00	39,80	84	!	1,50	0,2	N5	0,49
6	KP	Fichte	60,3		15,00	39,80	105	3	1,50	0,2	N6	0,49
7	KP	Fichte	69,4		15,00	39,80	122	3	1,50	0,5	N7	0,45
8	KP	Fichte	67,4		15,00	39,80	114	3	1,50	0,3	N8	0,56
9	KP	Fichte	64,2		15,00	39,80	114	3	1,50	0,5	N9	0,44
10	KP	Fichte	65,4		15,00	39,80	103	3	1,50	0,8	N10	0,49
11	KP	Fichte	65,8		15,00	39,80	111	5	1,50	0,7	N11	0,46
12	KP	Fichte	74,1		15,00	39,80	136	5	1,50	0,6	N12	0,46
13	KP	Fichte	67,9		15,00	39,80	117	3+Ast	1,50	0,2	N13	0,47
14	KP	Fichte	82,1		15,00	39,80	164	5	1,50	0,3	N14	0,58
15												
16												
17												
18												
19												
20												

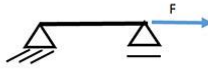
Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
 Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
 + Nettoquerschnitt
 !) Fehler im Einspannbereich

Prüfprotokoll zu Reihe W1					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
18.01.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%	Verkleb. u = 12%; Prüf. u = 12%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t,mittel}^{**}$	$f_{t,k}^{**}$	p_{mittel}
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	55,3	43,2	0,477

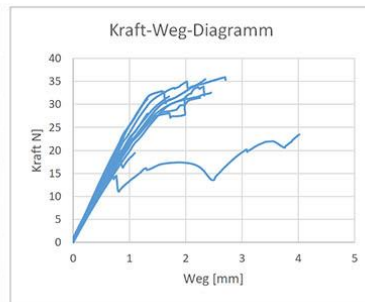
*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 E -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

- Bruchtyp**
- 1) Holz, außerhalb KZV
 - 2) KZV: Nettoquerschnitt
 - 3) KZV: Klebfuge
 - 4) KZV: Klebfuge;
Flankenscherung
 - 5) KZV: Klebfuge
+ Nettoquerschnitt
 - 6) Riss von KZV bis Auflager



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	32,8	11,2	15,00	39,80	68	1E	1,50	0,1	W1.1	-
2	KP	Fichte	59,8	11,9	15,00	39,80	152	3/5	1,50	0,2	W1.2	0,46
3	KP	Fichte	53,0	11,8	15,00	39,80	146	3/5	1,50	0,2	W1.3	0,47
4	KP	Fichte	54,9	12,4	15,00	39,80	162	3/5	1,50	0,2	W1.4	0,51
5	KP	Fichte	52,8	11,6	15,00	39,80	114	3/5	1,50	0,1	W1.5	0,49
6	KP	Fichte	53,5	12,5	15,00	39,80	130	1E	1,50	0,2	W1.6	-
7	KP	Fichte	46,6	12,2	15,00	39,80	100	3/5	1,50	0,2	W1.7	0,42
8	KP	Fichte	47,3	11,6	15,00	39,80	90	6	1,50	0,2	W1.8	0,46
9	KP	Fichte	57,8	11,7	15,00	39,80	144	3/5	1,50	0,6	W1.9	0,50
10	KP	Fichte	39,8	11,2	15,00	39,80	242	1E	1,50	0,3	W1.10	-
11	KP	Fichte	40,0	11,8	15,00	39,80	92	1E	1,50	0,6	W1.11	-
12	KP	Fichte	53,4	10,8	15,00	39,80	84	3/5	1,50	0,7	W1.12	0,56
13	KP	Fichte	60,5	11,4	15,00	39,80	169	3/5	1,50	0,2	W1.13	0,50
14	KP	Fichte	54,3	11,3	15,00	39,80	108	3/5	1,50	0,7	W1.14	0,43
15	KP	Fichte	48,0	11,5	15,00	39,80	104	3/5	1,50	0,1	W1.15	0,42
16	KP	Fichte	67,3	10	5,00	39,80	55	3/5	1,50	0,1	Z8	0,48
17	KP	Fichte	46,7	11	4,70	39,80	38	1E	1,50	0,0	Z9	0,48
18	KP	Fichte	68,4	12	5,30	39,80	60	3/5	1,50	0,0	Z10	0,50
19												
20												

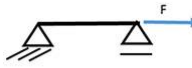
**** ermittelt mit Gann Einschlagelektrode

Prüfprotokoll zu Reihe W2					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
30.01.2017 & 20.03.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 45%	Verkleb. u = 12%; Prüf. u = 8%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{CL,mittel} **	f _{CL,k} **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	55,5	37,2	0,473

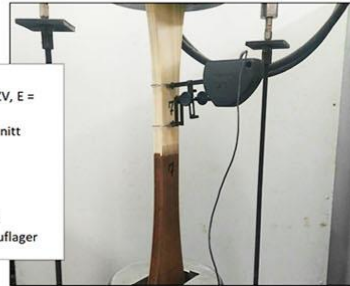
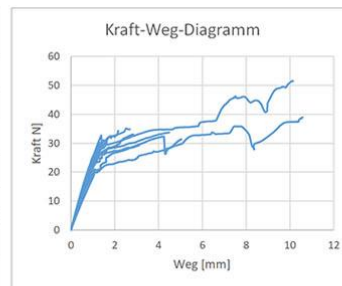
*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 E - ermittelt nach DIN EN 1058

*** in Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

- Bruchtyp**
- 1) Holz, außerhalb KZV, E = Einspannung
 - 2) KZV: Nettoquerschnitt
 - 3) KZV: Klebfuge
 - 4) KZV: Klebfuge; Flankenscherung
 - 5) KZV: Klebfuge + Nettoquerschnitt
 - 6) Riss von KZV bis Auflager



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdicke [g/cm³]
1	KP	Fichte	65,3	7,6	15,00	39,80	631	1 E	1,50	0,0	W2.1	-
2	KP	Fichte	49,0	7,5	15,00	39,80	191	3/5	1,50	0,0	W2.2	-
3	KP	Fichte	56,9	7,6	15,00	39,80	271	1 E	1,50	0,2	W2.3	-
4	KP	Fichte	45,7	7,5	15,00	39,80	83	1 E	1,50	0,3	W2.4	-
5	KP	Fichte	55,9	7,7	15,00	39,80	175	3/5	1,50	0,3	W2.5	0,43
6	KP	Fichte	59,0	7,8	15,00	39,80	172	1 E	1,50	0,1	W2.6	-
7	KP	Fichte	43,9	7,7	15,00	39,80	93	1 E	1,50	0,1	W2.7	-
8	KP	Fichte	58,0	7,7	15,00	39,80	142	1 E	1,50	0,3	W2.8	-
9	KP	Fichte	52,5	7,6	15,00	39,80	103	3/5	1,50	0,4	W2.9	0,48
10	KP	Fichte	52,3	7,9	15,00	39,80	105	3/5	1,50	0,1	W2.10	0,47
11	KP	Fichte	55,3	7,3	15,00	39,80	94	3/5	1,50	0,3	W2.11	0,51
12	KP	Fichte	86,5	7,2	15,00	39,80	596	3/5	1,50	0,1	W2.12	0,56
13	KP	Fichte	54,3	7,2	15,00	39,80	301	3/5	1,50	0,1	W2.13	0,43
14	KP	Fichte	33,3	7,4	15,00	39,80	70	1 E	1,50	0,7	W2.14	-
15	KP	Fichte	38,3	7,8	15,00	39,80	95	3/5	1,50	0,2	W2.15	0,51
16	KP	Fichte	54,7	7,5	4,50	39,80	41	3/5	1,50	0,20	Z1	0,43
17	KP	Fichte	52,4	7,9	5,50	39,80	58	3/5	1,50	0,00	Z2	0,46
18	KP	Fichte	43,6	7,6	4,80	39,80	38	3/5	1,50	0,00	Z3	0,44
19	KP	Fichte	60,6	7,6	4,50	39,80	38	3/5	1,50	0,10	Z4	0,48
20	KP	Fichte	50,5	8,3	5,70	39,80	51	3/5	1,50	0,20	Z5	0,45
21	KP	Fichte	71,1	8,2	4,80	39,80	53	3/5	1,50	0,10	Z6	0,48
22	KP	Fichte	72,3	8,3	4,60	39,80	56	3/5	1,50	0,00	Z7	0,50

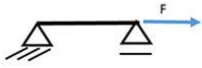
**** ermittelt mit Gann Einschlagelektrode

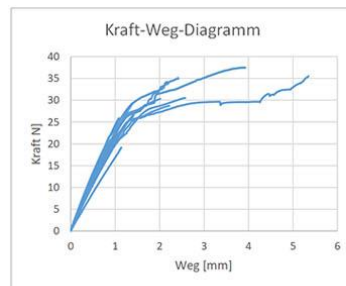
Prüfprotokoll zu Reihe W3					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
24.01.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 90%	Verkleb. u = 12%; Prüf. u = 18%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{tL} mittel **	f _{tL} K **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	48,6	34,8	0,486

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 E -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	43,8	17,6	15,00	39,80	88	3/5	1,50	0,3	W3.1	0,42
2	KP	Fichte	43,5	17,8	15,00	39,80	82	3/5	1,50	0,5	W3.2	0,52
3	KP	Fichte	60,1	17,4	15,00	39,80	329	3/5	1,50	0,3	W3.3	0,50
4	KP	Fichte	48,7	16,1	15,00	39,80	141	1	1,50	0,3	W3.4	-
5	KP	Fichte	63,8	17,0	15,00	39,80	246	3/5	1,50	0,6	W3.5	0,50
6	KP	Fichte	44,4	17,4	15,00	39,80	95	3/5	1,50	0,1	W3.6	0,41
7	KP	Fichte	58,0	16,9	15,00	39,80	141	1	1,50	0,4	W3.7	-
8	KP	Fichte	50,9	17,3	15,00	39,80	137	3/5	1,50	0,0	W3.8	0,41
9	KP	Fichte	51,5	16,9	15,00	39,80	158	3/5	1,50	0,2	W3.9	0,49
10	KP	Fichte	37,6	17,3	15,00	39,80	83	3/5	1,50	0,3	W3.10	0,51
11	KP	Fichte	32,4	16,2	15,00	39,80	80	1E	1,50	0,2	W3.11	-
12	KP	Fichte	43,9	16,7	15,00	39,80	78	3/5	1,50	0,3	W3.12	0,55
13	KP	Fichte	59,7	16,8	15,00	39,80	160	3/5	1,50	0,5	W3.13	0,55
14	KP	Fichte	49,4	16,7	15,00	39,80	95	3/5	1,50	0,3	W3.14	0,50
15	KP	Fichte	42,2	16,7	15,00	39,80	107	3/5	1,50	0,2	W3.15	0,45
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

Bruchtyp
 1) Holz, außerhalb KZV, E =
Einspannung
 2) KZV: Nettoquerschnitt
 3) KZV: Klebfuge
 4) KZV: Klebfuge;
Flankenscherung
 5) KZV: Klebfuge
+ Nettoquerschnitt
 6) Riss von KZV bis Auflager

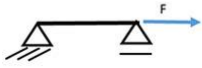
**** ermittelt mit Gann Einschlagelektrode

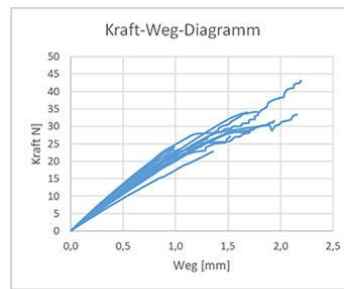
Prüfprotokoll zu Reihe W4					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
20.01.2017 & 20.03.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	Fichte + KP	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%	Kochbehandlung, Prüf.u=12%	DIN 52188*** DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,LMittel} **	f _{t,LK} **	p mittel
25% Lastabf..	1,5 mm/min	Deutsche Holzveredelung	50,3	34,3	0,478

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

** ohne Bruchtyp 1 E -
ermittelt nach DIN EN 1058

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



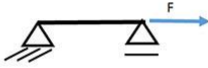
Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	u [%] ****	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	Fichte	56,3	10,3	15,00	39,80	138	1	1,50	0,2	W4.1	0,41
2	KP	Fichte	44,3	10,2	15,00	39,80	84	3/5	1,50	0,4	W4.2	0,46
3	KP	Fichte	45,6	10,2	15,00	39,80	102	3/5	1,50	0,1	W4.3	0,41
4	KP	Fichte	56,9	10,7	15,00	39,80	113	1E	1,50	-0,1	W4.4	-
5	KP	Fichte	46,3	11,4	15,00	39,80	97	1E	1,50	0,2	W4.5	-
6	KP	Fichte	39,4	10,6	15,00	39,80	71	1E	1,50	0,1	W4.6	-
7	KP	Fichte	72,2	10,0	15,00	39,80	145	3/5	1,50	0,0	W4.7	0,56
8	KP	Fichte	39,4	10,8	15,00	39,80	79	3/5	1,50	0,1	W4.8	0,44
9	KP	Fichte	40,4	11,3	15,00	39,80	64	3/5	1,50	0,1	W4.9	0,56
10	KP	Fichte	38,4	10,0	15,00	39,80	93	3/5	1,50	0,1	W4.10	0,46
11	KP	Fichte	51,0	10,9	15,00	39,80	122	3/5	1,50	0,2	W4.11	0,42
12	KP	Fichte	57,7	10,6	15,00	39,80	115	3/5	1,50	0,3	W4.12	0,50
13	KP	Fichte	53,1	10,4	15,00	39,80	126	3/5	1,50	0,1	W4.13	0,52
14	KP	Fichte	48,1	10,6	15,00	39,80	112	3/5	1,50	0,1	W4.14	0,50
15	KP	Fichte	36,5	10,9	15,00	39,80	100	1E	1,50	0,1	W4.15	-
16	KP	Fichte	61,3	11,4	3,90	39,80	44	3/5	1,50	0,0	Z11	0,48
17	KP	Fichte	56,6	12,1	4,70	39,80	49	3/5	1,50	0,0	Z12	0,49
18												
19												
20												
21												
22												

**** ermittelt mit Gann Einschlagelektrode

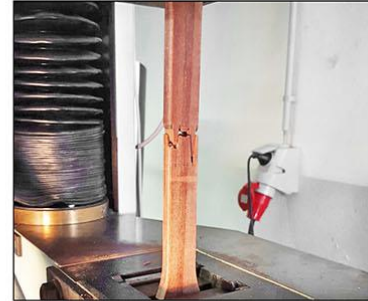
Prüfprotokoll zu Reihe KP + KP					
Thema	Keilzinkenfestigkeit KP + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
09.10.2015	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	KP + KP		Deho, D.B.
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Werk Deho	20°C / 65%	Variation des Pressdrucks		ISO 527
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t, \text{mittel}}^{**}$	$f_{t, \text{c}}^{**}$	p mittel
	unbekannt	Deutsche Holzveredelung	77,8	54,0	

*BAKELITE PF 0283 HL + BAKELITE PFH 018

** für Reihe 1,15 to -
ermittelt nach DIN EN 1058

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{\text{max}}}{A}$

Externe Prüfung im Werk
Deutsche Holzveredelung
Schmeing GmbH & Co. KG,
Kirchhundem



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Pressdruck p [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	f _{t,mean} **** [N/mm²]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdichte [g/cm³]
1	KP	KP	96,8	8,9	10,11	20,05	78,8	2			1,15 to 1	
2	KP	KP	88,2	8,9	10,18	20,09		2			1,15 to 2	
3	KP	KP	64,3	8,9	10,20	20,06		2			1,15 to 3	
4	KP	KP	64,3	8,9	10,17	20,09		2			1,15 to 4	
5	KP	KP	67,3	8,9	10,11	20,08		2			1,15 to 5	
6	KP	KP	93,5	8,9	10,18	20,08		2			1,15 to 6	
7	KP	KP	74,7	8,9	10,20	20,05		2			1,15 to 7	
8	KP	KP	81,2	8,9	10,23	20,10		2			1,15 to 8	
9	KP	KP	67,5	10,0	10,08	19,98	71,6	2			1,3 to 1	
10	KP	KP	57,7	10,0	10,10	19,97		2			1,3 to 2	
11	KP	KP	75,8	10,0	10,07	19,93		2			1,3 to 3	
12	KP	KP	75,9	10,0	10,18	19,84		2			1,3 to 4	
13	KP	KP	81,2	10,0	10,27	20,01		2	Bruchtyp 1) Holz, außerhalb KZV 2) KZV: Nettoquerschnitt 3) KZV: Klebfuge 4) KZV: Klebfuge; Flankenscherung 5) KZV: Klebfuge + Nettoquerschnitt		1,3 to 5	
14	KP	KP	64,8	15,4	10,21	19,84	2			2,0 to 1		
15	KP	KP	73,2	15,4	10,15	19,87	2			2,0 to 2		
16	KP	KP	64,3	15,4	10,08	19,94	2			2,0 to 3		
17	KP	KP	76,6	15,4	10,02	19,96	2			2,0 to 4		
18	KP	KP	48,7	15,4	10,06	20,05	2			2,0 to 5		
19	KP	KP	54,5	15,4	10,14	19,92	2			2,0 to 6		
20	KP	KP	43,1	15,4	10,02	19,96	60,7	2			2,0 to 7	

**** Mittelwert als arithmetisches Mittel der unterschiedlichen Versuchsreihen

***** Quelle: Deutsche Holzveredelung Schmeing, Marc Schmeing

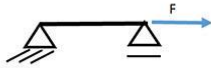
Bruchtyp
1) Holz, außerhalb KZV
2) KZV: Nettoquerschnitt
3) KZV: Klebfuge
4) KZV: Klebfuge;
Flankenscherung
5) KZV: Klebfuge
+ Nettoquerschnitt

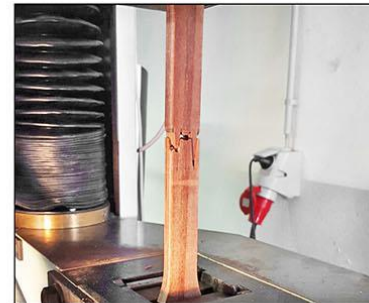
Prüfprotokoll zu Reihe KP + KP					
Thema	Keilzinkenfestigkeit KP + KP, I20, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
09.10.2015	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	KP + KP		Deho, D.B.
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Werk Deho	20°C / 65%	Variation des Pressdrucks		ISO 527
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t, \text{mittel}}^{**}$	$f_{t, c}^{**}$	p_{mittel}
	unbekannt	Deutsche Holzveredelung			

Externe Prüfung im Werk
Deutsche Holzveredelung
Schmeing GmbH & Co. KG,
Kirchhundem

*BAKELITE PF 0283 HL + BAKELITE PFH 018

**
ermittelt nach DIN EN 1058

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{\text{max}}}{A}$



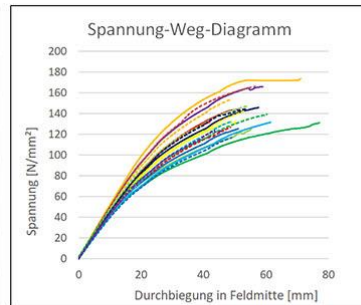
Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Pressdruck p [N/mm²]	b [mm]	z [mm]	f _{t,mean} **** [N/mm²]	Bruch	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Holzdicke [g/cm³]
21	KP	KP	47,4	1,5	9,95	20,02	42,7	5			0,2 to	
22	KP	KP	32,6	1,5	10,03	19,97		5			0,2 to	
23	KP	KP	39,9	1,5	10,17	20,06		5			0,2 to	
24	KP	KP	46,8	1,5	10,13	19,90		5			0,2 to	
25	KP	KP	45,8	1,5	9,94	19,91		5			0,2 to	
26	KP	KP	45,6	1,5	10,02	19,91		5			0,2 to	
27	KP	KP	47,2	1,5	20,12	19,90		5			0,2 to	
28	KP	KP	36,6	1,5	10,15	20,17		5			0,2 to	
29	KP	KP	50,2	4,2	10,07	20,07	67,7	2			0,55 to	
30	KP	KP	49,5	4,2	10,12	20,04		2			0,55 to	
31	KP	KP	74,3	4,2	10,07	20,07		2			0,55 to	
32	KP	KP	81,8	4,2	10,09	20,06		2			0,55 to	
33	KP	KP	76,9	4,2	10,07	20,07		2	Bruchtyp 1) Holz, außerhalb KZV 2) KZV: Nettoquerschnitt 3) KZV: Klebfuge 4) KZV: Klebfuge; Flankenscherung 5) KZV: Klebfuge + Nettoquerschnitt		0,55 to	
34	KP	KP	73,4	4,2	10,07	20,06		2			0,55 to	
35	KP	KP	64,7	6,9	10,07	19,95	76,3	2			0,9 to	
36	KP	KP	88,0	6,9	10,15	19,85		2			0,9 to	
37	KP	KP	70,6	6,9	10,23	19,84		2			0,9 to	
38	KP	KP	78,9	6,9	10,22	19,88		2			0,9 to	
39	KP	KP	79,6	6,9	10,09	19,91		2			0,9 to	

Bruchtyp
1) Holz, außerhalb KZV
2) KZV: Nettoquerschnitt
3) KZV: Klebfuge
4) KZV: Klebfuge;
Flankenscherung
5) KZV: Klebfuge
+ Nettoquerschnitt

**** Mittelwert als arithmetisches Mittel der unterschiedlichen Versuchsreihen

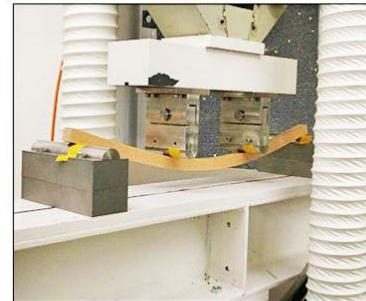
***** Quelle: Deutsche Holzveredelung Schmeing, Marc Schmeing

Prüfprotokoll, Reihe Buchenholz $E > 15.000 \text{ N/mm}^2$					
Thema	Biegefestigkeit Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
11'2015	HBV-Brücke	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	SR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	$u = 10\%$	$E_{dyn} > 15.000 \text{ N/mm}^2$	DIN 52186** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	E_{mittel}^{****}
25% Lastabf.	5 mm/min	Schaffitzel	139,3	113,5	16417



System					
	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				

** = in
Anlehnung an



Parameter										
n	Prüfkörper	Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	$f_{m,mean}^{****}$ [N/mm²]	$E_{m,mean}^{****}$ [N/mm²]	dyn. Emodul [N/mm²]	Prüfkörper Bezeichnung u Prüfung***
1	Buche	143,9	16313	96,0	20,0	390	140,1	16417	16246	N1 10,0%
2	Buche	132,1	16468	96,0	20,0	366			15075	N2 10,0%
3	Buche	173,4	19289	96,0	20,0	502			19670	N3 10,0%
4	Buche	132,5	15629	96,0	20,0	346			15624	N4 10,0%
5	Buche	128,3	15734	96,0	20,0	333			16367	N5 10,0%
6	Buche	130,9	14968	96,0	20,0	343			16313	N6 10,0%
7	Buche	131,5	14510	96,0	20,0	345			15969	N7 10,0%
8	Buche	125,2	15622	96,0	20,0	341			16431	N8 10,0%
9	Buche	145,7	16736	96,0	20,0	408			16868	N9 10,0%
10	Buche	165,7	18493	96,0	20,0	545			18450	N10 10,0%
11	Buche	166,0	18490	96,0	20,0	460			19072	N11 10,0%
12	Buche	126,8	15677	96,0	20,0	333			17451	N12 10,0%
13	Buche	153,4	17919	96,0	20,0	413			15969	N13 10,0%
14	Buche	142,6	16831	96,0	20,0	396			17143	N14 10,0%
15	Buche	147,3	17476	96,0	20,0	399			17590	N15 10,0%
16	Buche	139,0	15847	96,0	20,0	381			16990	N16 10,0%
17	Buche	132,7	15032	96,0	20,0	432			14825	N17 10,0%
18	Buche	116,6	14538	96,0	20,0	322			15444	N18 10,0%
19	Buche	144,5	16686	96,0	20,0	394			16932	N19 10,0%
20	Buche	123,7	16077	96,0	20,0	357			16910	N20 10,0%


**** arithmetisches Mittel

*** Lagerung bei ca. 20°C, 55% rel. Luftfeuchte

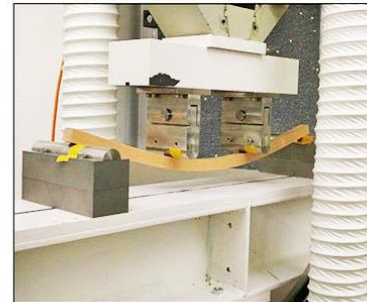
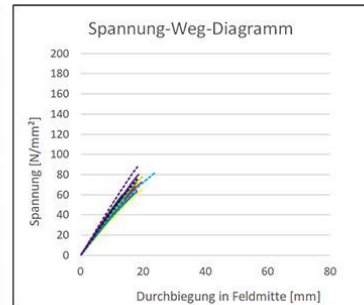
Prüfprotokoll, Reihe Klebstoff PUR *					
Thema	Biegefestigkeit Keilzinkenverbindung I15 + PUR, Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
11'2015	HBV-Brücke	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	SR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Bau 60	u = 10%	E _{dyn} > 15.000 N/mm²		DIN 52186** DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	E _{mittel} ****
25% Lastabf.	5 mm/min	Schaffitzel	64,9	49,3	16032

* Purbond HB 5209

** = in
Anlehnung an

System					
	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n	
	600	200	200	3	

Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$
--------	--

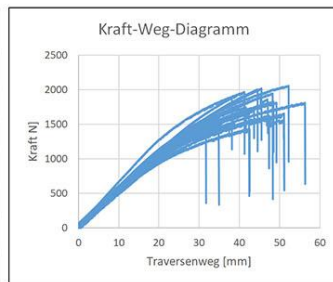


Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm²]	E _{m,mean} **** [N/mm²]	dyn. Emodul [N/mm²]	Prüfkörper Bezeichnung u Prüfung***
1	Buche	Buche	72,6	15732	96,0	20,0	196	65,5	16032	-	NN1 10,0%
2	Buche	Buche	68,2	16073	96,0	20,0	194			-	NN2 10,0%
3	Buche	Buche	73,6	16183	96,0	20,0	199			-	NN3 10,0%
4	Buche	Buche	61,6	14502	96,0	20,0	167			-	NN4 10,0%
5	Buche	Buche	54,9	15493	96,0	20,0	151			-	NN5 10,0%
6	Buche	Buche	44,7	15286	96,0	20,0	122			-	NN6 10,0%
7	Buche	Buche	58,7	16751	96,0	20,0	161			-	NN7 10,0%
8	Buche	Buche	63,5	14526	96,0	20,0	171			-	NN8 10,0%
9	Buche	Buche	59,9	17911	96,0	20,0	160			-	NN9 10,0%
10	Buche	Buche	74,1	16871	96,0	20,0	214			-	NN10 10,0%
11	Buche	Buche	64,3	17350	96,0	20,0	204			-	NN11 10,0%
12	Buche	Buche	58,8	15153	96,0	20,0	156			-	NN12 10,0%
13	Buche	Buche	75,1	16382	96,0	20,0	205			-	NN13 10,0%
14	Buche	Buche	65,4	13735	96,0	20,0	177			-	NN14 10,0%
15	Buche	Buche	52,0	16248	96,0	20,0	141			-	NN15 10,0%
16	Buche	Buche	72,8	16310	96,0	20,0	197			-	NN16 10,0%
17	Buche	Buche	74,8	14741	96,0	20,0	219			-	NN17 10,0%
18	Buche	Buche	68,1	15240	96,0	20,0	173			-	NN18 10,0%
19	Buche	Buche	74,5	16778	96,0	20,0	202			-	NN19 10,0%
20	Buche	Buche	73,2	19367	96,0	20,0	236			-	NN20 10,0%

**** arithmetisches Mittel

*** Lagerung bei ca. 20°C, 55% rel. Luftfeuchte

Prüfprotokoll, Reihe Bu, u1-u4					
Thema	Biegefestigkeit Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
12'17 - 01'18	Technologie des Holzes	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	DR / RK	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 0% - 8% Holzfeuchte	keilzinkenfrei	DIN 52186** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	7,2 mm/min	DR/RK			



** = in
Anlehnung an

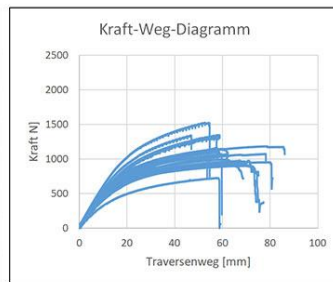
System				
	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_1 [mm]	n
	600	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$			



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm²]	E _{m,mean} **** [N/mm²]	dyn. Emodul [N/mm²]	Prüfkörper Bezeichnung	u Prüfung***
1	Buche	82	153,5	14620	19,50	19,50	392	157	14827	13502	A1	0,6%
2	Buche	79	140,5	13861	19,60	19,60	281			13766	A2	0,5%
3	Buche	117	162,7	14830	19,30	19,65	379			13604	A3	0,2%
4	Buche	115	158,3	14329	19,60	19,70	371			13780	A4	0,4%
5	Buche	109	152,5	15325	19,30	19,60	318			13986	A5	0,3%
6	Buche	92	173,2	15996	19,50	20,20	341			13674	A6	0,2%
7	Buche	79	158,4	14627	19,50	20,00	281	139	13830	13986	B1	3,8%
8	Buche	82	122,6	13643	19,50	20,00	281			13780	B2	4,0%
9	Buche	92	150,0	14277	19,50	20,00	281			13604	B3	4,8%
10	Buche	109	139,4	12901	19,50	20,00	281			13766	B4	5,3%
11	Buche	115	122,7	13700	19,50	20,00	281			13674	B5	4,2%
12	Buche	79	125,2	13007	19,50	20,00	281	127	12934	13986	C1	7,7%
13	Buche	82	112,3	11145	20,00	20,00	281			13780	C2	8,0%
14	Buche	92	128,7	13642	20,00	20,00	281			13604	C3	8,0%
15	Buche	109	116,0	12210	19,80	19,90	264			13766	C4	5,2%
16	Buche	115	139,2	13700	19,70	20,00	281			13674	C5	6,0%
17	Buche	117	140,2	13897	19,60	19,90	281	125	13653	13502	C6	6,2%
18	Buche	82	119,0	13338	20,00	20,00	281			13780	D1	8,5%
19	Buche	117	124,8	13283	19,90	20,00	281			13502	D2	8,9%
20	Buche	115	124,1	13433	20,10	20,00	281			13674	D3	8,2%
21	Buche	92	139,9	14802	20,10	20,50	281			13604	D4	8,4%
22	Buche	109	133,5	14829	19,80	19,90	281			13766	D5	8,3%
23	Buche	79	110,2	12236	19,90	19,80	281			13986	D5	8,3%

**** arithmetisches Mittel *** ermittelt mittels Darmmethode

Prüfprotokoll, Reihe Bu, u5-u7					
Thema	Biegefestigkeit Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
12'17 - 01'18	Technologie des Holzes	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	DR / RK	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 14% - > 30% Holzfeuchte	keilzinkenfrei	DIN 52186** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	7,2 mm/min	DR/RK			



** = in
Anlehnung an

System				
	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n
	600	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$			



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm²]	E _{m,mean} **** [N/mm²]	dyn. Emodul [N/mm²]	Prüfkörper Bezeichnung	u Prüfung***
24	Buche	117	96,0	11832	20,30	20,40	491	95	11950	13502	A1	13,8%
25	Buche	109	96,9	12639	20,40	20,20	281			13766	A2	13,9%
26	Buche	92	103,4	12948	20,50	20,80	456			13604	A3	13,8%
27	Buche	82	92,5	11682	20,70	20,40	480			13780	A4	13,9%
28	Buche	79	82,0	10041	20,70	20,30	483			13986	A5	13,8%
29	Buche	115	100,5	12558	20,50	20,30	392			13674	A6	13,4%
30	Buche	109	76,8	11568	21,00	20,50	281	75	10937	13766	B1	16,0%
31	Buche	92	78,1	11314	21,50	20,60	281			13604	B2	19,6%
32	Buche	115	75,1	11357	21,00	20,50	281			13674	B3	18,3%
33	Buche	82	71,1	10938	21,50	20,50	281			13780	B4	18,6%
34	Buche	117	78,1	10759	21,00	20,50	281			13502	B5	17,0%
35	Buche	79	70,1	9688	21,50	20,70	281			13986	C1	20,0%
36	Buche	115	60,4	9920	22,40	20,80	281	58	9527	13674	C2	72,6%
37	Buche	82	56,4	10069	22,30	20,80	281			13780	C3	61,6%
38	Buche	109	63,4	10637	21,70	20,70	281			13766	C4	71,7%
39	Buche	79	46,2	7287	22,50	20,50	281			13986	C5	69,8%
40	Buche	117	61,0	9137	22,00	20,90	281			13502	C6	71,0%
41	Buche	92	62,0	10115	20,50	21,70	281			13604	D1	71,5%

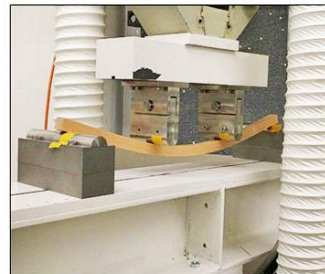
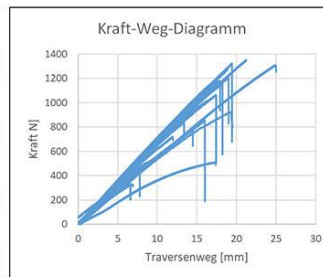
**** arithmetisches Mittel *** ermittelt mittels Darmmethode

Prüfprotokoll, Reihe Bu-Bu, u1-u4				
Thema	Keilzinkenfestigkeit Buche KZV I-15, PU*			
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer
12' 2017	Technologie des Holzes	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	DR / RK
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm
Weg	T-Lab	u = 0% - > 30% Holzfeuchte	KZV I-15	DIN 52186** DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller		
25% Lastabf.	3,2 mm/min	DR/RK	Prüfkörper entstammen unterschiedlichen Lieferechungen	

*PU Purbond HB S209

** = in
Anlehnung an

System	
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$



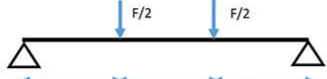
Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm²]	E _{m,mean} **** [N/mm²]	Bruch	Prüfkörper Bezeichnung	u Prüfung**
1	Buche	Buche	63,0	13327	20,10	20,15	300	88	14949	1)	A1	0,0%
2	Buche	Buche	93,4	13146	20,21	20,40	281			1)	A2	0,0%
3	Buche	Buche	91,8	16690	20,30	20,30	354			1)	A3	0,0%
4	Buche	Buche	96,6	15320	20,20	20,40	398			1)	A4	0,0%
5	Buche	Buche	95,4	16566	20,20	20,30	365			1)	A5	0,0%
6	Buche	Buche	87,5	14644	20,20	20,30	379			1)	A6	0,0%
7	Buche	Buche	74,9	14886	19,50	19,50	163	91	18477	1)	B1	6,3%
8	Buche	Buche	94,0	18726	19,50	19,50	281			1)	B2	6,6%
9	Buche	Buche	97,4	20127	19,50	19,50	281			1)	B3	6,5%
10	Buche	Buche	97,6	19929	19,50	19,50	281			1)	B4	6,5%
11	Buche	Buche	86,2	18059	19,50	19,50	281			1)	B5	7,2%
12	Buche	Buche	95,5	19135	19,50	19,50	281			1)	B6	6,7%
13	Buche	Buche	49,7	12568	20,70	20,50	225	60	14125	1)	C1	12,3%
14	Buche	Buche	62,6	15197	20,70	20,50	269			1)	C2	12,5%
15	Buche	Buche	70,4	12591	20,70	20,50	281			1)	C3	12,2%
16	Buche	Buche	58,1	15378	20,70	20,50	251			1)	C4	12,6%
17	Buche	Buche	66,4	15844	20,70	20,50	276			1)	C5	12,3%
18	Buche	Buche	53,7	13172	20,70	20,50	272			1)	C6	12,4%
19	Buche	Buche	19,7	9587	22,40	21,20	124	27	10196	1)	D1	74,2%
20	Buche	Buche	33,1	11388	22,80	21,20	194			1)	D2	63,1%
21	Buche	Buche	28,0	11960	22,40	21,50	146			1)	D3	92,0%
22	Buche	Buche	29,8	11830	22,40	21,40	163			1)	D4	54,5%
23	Buche	Buche	30,2	7093	22,10	21,40	281			1)	D5	66,3%
24	Buche	Buche	18,8	9320	22,90	21,40	130			1)	D6	80,8%

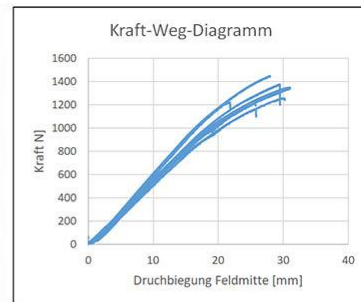
**** arithmetisches Mittel *** ermittelt mittels Darmmethode

Prüfprotokoll, Reihe Klebstoff MUF*					
Thema	Biegefestigkeit Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
01.08.2018	Zukunft Bau: Acetylierte Buche	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	Kessler	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	u = 12%	E _{dyn} > 15.000 N/mm ²	DIN 52186** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{mean}	f _{m,k}	E _{mittel} ****
25% Lastabf.	4,3 mm/min	RK	96,2	83,2	16788

* Kauramin 683 mit Härter Kauramin 688

** = in
Anlehnung an

System					
	l/3 [mm]	l1 [mm]	l/3 [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				




Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm ²]	E _{m,mean} **** [N/mm ²]	dyn. E-Modul [N/mm ²]	Prüfkörper Bezeichnung u Prüfung***
1	Buche	21	103,2	17956	20,00	20,00	355	96,4	16788	-	MUF1.1 12,0%
2	Buche	22	94,2	15572	20,00	20,00	256			-	MUF1.2 12,0%
3	Buche	38	100,6	15765	20,00	20,00	372			-	MUF1.3 12,0%
4	Buche	60	101,1	15899	20,00	20,00	373			-	MUF1.4 12,0%
5	Buche	69	94,4	15934	20,00	20,00	321			-	MUF1.5 12,0%
6	Buche	79	92,2	16857	20,00	20,00	334			-	MUF1.6 12,0%
7	Buche	80	87,1	16129	20,00	20,00	256			-	MUF1.7 12,0%
8	Buche	95	91,5	18502	20,00	20,00	256			-	MUF1.8 12,0%
9	Buche	102	90,7	16473	20,00	20,00	258			-	MUF1.9 12,0%
10	Buche	115	108,6	18798	20,00	20,00	256			-	MUF1.10 12,0%
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											

**** arithmetisches Mittel *** Lagerung im Normalklima

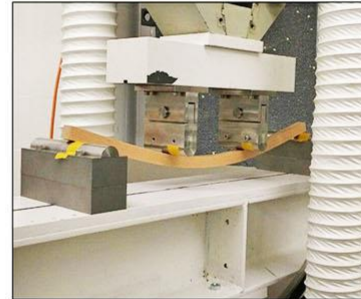
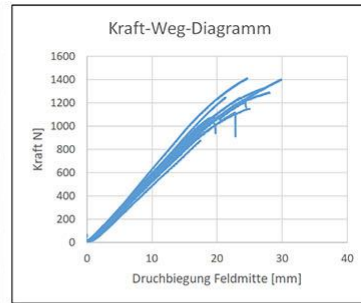
Prüfprotokoll, Reihe Klebstoff PRF*					
Thema	Biegefestigkeit Buche				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
01.08.2018	Zukunft Bau: Acetylierte Buche	4-Punkt-Biegeversuch	Buche	Kessler	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	u = 12%	E _{dyn} > 15.000 N/mm ²	DIN 52186** DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{mean}	f _{m,k}	E _{mittel} ****
25% Lastabf.	4,3 mm/min	RK	84,3	57,5	16505

* Aerodux

** = in
Anlehnung an

System					
	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n	
	600	200	200	200	3

Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				
--------	--	--	--	--	--

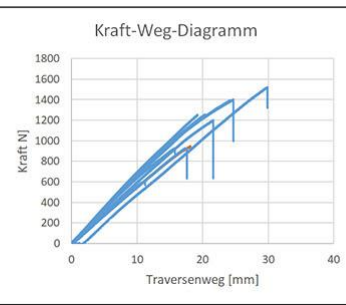


Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Zeit [s]	f _{m,mean} **** [N/mm²]	E _{m,mean} **** [N/mm²]	dyn. E-Modul [N/mm²]	Prüfkörper Bezeichnung	u Prüfung***
1	Buche	4	65,7	14948	20,00	20,00	210	85,7	16505,4	-	PRF1.1	12,0%
2	Buche	69	68,4	15640	20,00	20,00	200			-	PRF1.2	12,0%
3	Buche	77	70,5	14588	20,00	20,00	210			-	PRF1.3	12,0%
4	Buche	101	50,9	16574	20,00	20,00	139			-	PRF1.4	12,0%
5	Buche	4	105,1	17197	20,00	20,00	359			-	PRF1.5	12,0%
6	Buche	21	106,9	17004	20,00	20,00	368			-	PRF1.6	12,0%
7	Buche	22	92,4	17289	20,00	20,00	258			-	PRF1.7	12,0%
8	Buche	38	99,4	17251	20,00	20,00	256			-	PRF1.8	12,0%
9	Buche	60	77,4	15957	20,00	20,00	238			-	PRF1.9	12,0%
10	Buche	69	86,2	15235	20,00	20,00	258			-	PRF1.10	12,0%
11	Buche	69	93,3	17209	20,00	20,00	258			-	PRF1.11	12,0%
12	Buche	77	93,4	16848	20,00	20,00	256			-	PRF1.12	12,0%
13	Buche	79	90,3	15964	20,00	20,00	258			-	PRF1.13	12,0%
14	Buche	80	83,8	16028	20,00	20,00	258			-	PRF1.14	12,0%
15	Buche	95	105,9	18937	20,00	20,00	258			-	PRF1.15	12,0%
16	Buche	101	75,7	16931	20,00	20,00	209			-	PRF1.16	12,0%
17	Buche	102	96,8	16139	20,00	20,00	256			-	PRF1.17	12,0%
18	Buche	115	80,8	17361	20,00	20,00	236			-	PRF1.18	12,0%

**** arithmetisches Mittel


*** Lagerung im Normalklima

Prüfprotokoll, v1					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Buche-Buche, KZV I-15, v1				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
01.06.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Buche + Buche		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	T-Lab	20°C / 65% für 12 Monate			DIN 52186* DIN EN 408*
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	t_{mittel}
Bruch	3,5 mm/min	DR	69,5	34,0	335



*PU Purbond HB S209

* = in
Anlehnung an

System					
	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				




Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Bu	BU	65,9	18,2	20,10	20,74	2		363	v1.1	12,0%	-
2	Bu	BU	41,8	11,2	19,96	20,93	1		193	v1.2	12,0%	-
3	Bu	BU	62,4	15,8	20,06	21,10	1		270	v1.3	12,0%	-
4	Bu	BU	81,0	21,6	20,05	21,08	2		371	v1.4	12,0%	-
5	Bu	BU	95,1	24,7	20,05	21,01	1		423	v1.5	12,0%	-
6	Bu	BU	94,0	24,1	19,95	21,12	1		414	v1.6	12,0%	-
7	Bu	BU	38,4	9,8	20,05	20,95	1		168	v1.7	12,0%	-
8	Bu	BU	63,5	17,6	20,01	20,95	1		302	v1.8	12,0%	-
9	Bu	BU	84,8	19,3	19,90	21,12	2		330	v1.9	12,0%	-
10	Bu	BU	102,6	29,9	20,00	21,10	1		512	v1.10	12,0%	-
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Bruchtyp
1) KZV Klebfuge
2) KZV Klebfuge + Scher
3) KZV NQ

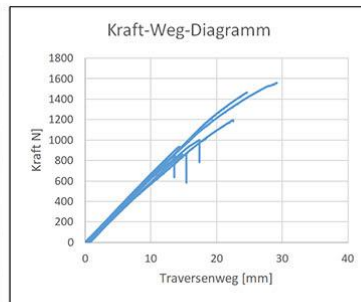
Prüfprotokoll, v2					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Buche-Buche, KZV I-15, v2				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
01.06.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Buche + Buche	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65% für 12 Monate		DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	t_{mittel}
Bruch	12 mm/min	DR	74,9	46,1	98

*PU Purbond HB S209

* = in
Anlehnung an

System					
	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_1 [mm]	n	
600	200	200	200	3	

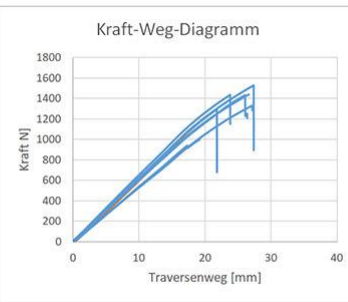
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				
--------	--	--	--	--	--



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Bu	BU	84,3	22,6	19,38	20,96	3		135	v2.1	12,0%	-
2	Bu	BU	58,2	13,7	20,00	20,93	1		69	v2.2	12,0%	-
3	Bu	BU	64,2	14,4	20,10	20,87	1		72	v2.3	12,0%	-
4	Bu	BU	73,7	19,1	20,00	20,62	1		104	v2.4	12,0%	-
5	Bu	BU	110,6	29,2	19,69	20,73	1		146	v2.5	12,0%	-
6	Bu	BU	71,9	17,5	20,08	20,41	1		87	v2.6	12,0%	-
7	Bu	BU	54,5	13,6	20,95	21,19	2		68	v2.7	12,0%	-
8	Bu	BU	84,8	19,3	19,98	20,74	1		97	v2.8	12,0%	-
9	Bu	BU	65,0	15,4	18,78	20,62	1		77	v2.9	12,0%	-
10	Bu	BU	100,6	24,7	20,04	20,89	1		123	v2.10	12,0%	-
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Bruchtyp
1) KZV Klebfuge
2) KZV Klebfuge + Scher
3) KZV NQ

Prüfprotokoll, v3					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Buche-Buche, KZV I-15, v1				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
01.06.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Buche + Buche	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65% für 12 Monate		DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{m,mean}$	$f_{m,k}$	t_{mittel}
Bruch	24 mm/min	DR	83,9	46,2	56



*PU Purbond HB S209

* = in
Anlehnung an

System					
	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				




Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Bu	BU	76,9	18,7	20,0	21,1	2		47	v3.1	12,0%	-
2	Bu	BU	97,0	23,9	19,9	21,1	2		60	v3.2	12,0%	-
3	Bu	BU	104,5	27,4	19,9	21,0	1		69	v3.3	12,0%	-
4	Bu	BU	40,4	9,4	20,0	20,9	1		24	v3.4	12,0%	-
5	Bu	BU	88,5	21,8	20,1	20,9	2		55	v3.5	12,0%	-
6	Bu	BU	103,1	26,4	19,7	20,6	1		66	v3.6	12,0%	-
7	Bu	BU	96,2	26,7	20,1	21,1	2		67	v3.7	12,0%	-
8	Bu	BU	100,3	27,2	20,0	20,0	1		68	v3.8	12,0%	-
9	Bu	BU	73,7	19,2	19,9	20,2	2		48	v3.9	12,0%	-
10	Bu	BU	84,6	21,0	20,0	20,7	1		53	v3.10	12,0%	-
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

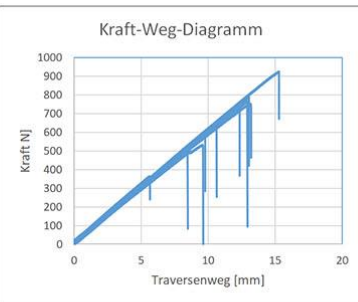
Bruchtyp
1) KZV Klebfuge
2) KZV Klebfuge + Scher
3) KZV NQ

Prüfprotokoll, Reihe LC					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 0 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.05.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 0 % Holzfeuchte	KZV I-15	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	3,2 -2,3 mm/min	Deho / Röver	46,8	26,1	0,433

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

* = in
Anlehnung an

System					
	l ₁ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				




Parameter											
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge C	37,4	8,5	20,78	19,95	1	159	C1	0,0%	0,515
2	Fichte	KP; Charge C	47,2	10,6	20,80	19,96	1	199	C2	0,0%	0,473
3	Fichte	KP; Charge C	54,1	12,4	20,72	19,85	1	297	C3	0,0%	0,428
4	Fichte	KP; Charge C	42,1	9,8	20,80	19,91	3	235	C4	0,0%	0,405
5	Fichte	KP; Charge C	54,8	12,2	20,65	19,97	2	318	C5	0,0%	0,364
6	Fichte	KP; Charge C	56,0	12,9	20,78	19,92	2	337	C6	0,0%	0,396
7	Fichte	KP; Charge C	26,5	5,7	20,64	20,00	1	158	C7	0,0%	0,491
8	Fichte	KP; Charge C	68,2	15,3	20,60	19,90	2	399	C8	0,0%	0,392
9	Fichte	KP; Charge C	38,6	9,6	20,90	19,93	1	251	C9	0,0%	0,466
10	Fichte	KP; Charge C	58,4	13,1	20,53	19,92	2	341	C10	0,0%	0,397
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											

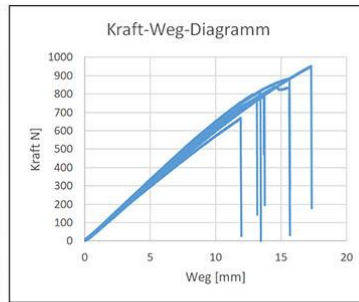
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

Prüfprotokoll, Reihe LA					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.05.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	KZV I-15	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	54,2	45,2	0,433

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

* = in
Anlehnung an

System					
	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



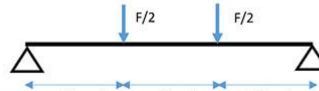
Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge A	54,2	13,8	21,61	20,23	1		358	A1	12,0%	0,515
2	Fichte	KP; Charge A	56,7	15,7	21,49	20,36	1		408	A2	12,0%	0,473
3	Fichte	KP; Charge A	45,7	12,0	21,30	20,33	1		311	A3	12,0%	0,428
4	Fichte	KP; Charge A	52,8	13,2	21,55	20,28	3+2		343	A4	12,0%	0,405
5	Fichte	KP; Charge A	52,3	13,3	21,53	20,28	1+2		347	A5	12,0%	0,364
6	Fichte	KP; Charge A	54,1	13,5	21,60	20,40	1+2		350	A6	12,0%	0,396
7	Fichte	KP; Charge A	53,3	13,7	21,50	20,36	1		357	A7	12,0%	0,491
8	Fichte	KP; Charge A	59,2	15,7	21,60	20,39	1+2		408	A8	12,0%	0,392
9	Fichte	KP; Charge A	63,7	17,3	21,60	20,40	1		451	A9	12,0%	0,466
10	Fichte	KP; Charge A	52,3	12,6	21,64	20,37	1+2		329	A10	12,0%	0,397
11							Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

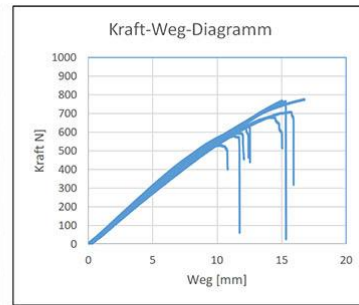
Prüfprotokoll, Reihe LB					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 24 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.05.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 24 % Holzfeuchte	KZV I-15	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	42,9	32,6	0,433

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

* = in
Anlehnung an

System					
	l_k [mm]	l_1 [mm]	l_k [mm]	n	
	600	200	200	3	

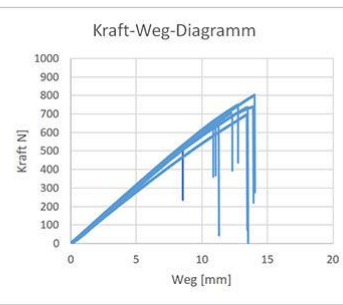
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$
--------	--



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge B	49,9	15,4	22,20	20,53	1		400	B1	24,0%	0,515
2	Fichte	KP; Charge B	43,8	15,0	21,85	20,70	1		361	B2	24,0%	0,473
3	Fichte	KP; Charge B	45,7	15,9	21,99	20,57	1		382	B3	24,0%	0,428
4	Fichte	KP; Charge B	39,7	12,1	21,82	20,54	3		290	B4	24,0%	0,405
5	Fichte	KP; Charge B	38,3	11,7	21,81	20,49	2		282	B5	24,0%	0,364
6	Fichte	KP; Charge B	33,5	10,8	22,35	20,65	2		260	B6	24,0%	0,396
7	Fichte	KP; Charge B	49,3	15,3	21,90	20,63	1		368	B7	24,0%	0,491
8	Fichte	KP; Charge B	41,1	12,5	21,99	20,56	2		301	B8	24,0%	0,392
9	Fichte	KP; Charge B	49,9	16,8	22,00	20,62	1		402	B9	24,0%	0,466
10	Fichte	KP; Charge B	40,8	12,4	21,90	20,57	2		298	B10	24,0%	0,397
11							<div>Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP</div>					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

Prüfprotokoll, Reihe LD					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
04.06.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	darrgetrocknet, dann aufgef.	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	54,2	45,2	0,433



*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

* = in
Anlehnung an

System					
	l ₆ [mm]	l ₁ [mm]	l ₆ [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp		Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge D	36,2	8,5	21,15	20,24	1		220	D1	12,0%	0,515
2	Fichte	KP; Charge D	45,6	11,1	21,03	20,36	1		289	D2	12,0%	0,473
3	Fichte	KP; Charge D	51,4	12,8	21,39	20,24	1		333	D3	12,0%	0,428
4	Fichte	KP; Charge D	46,7	11,3	21,03	20,33	2		294	D4	12,0%	0,405
5	Fichte	KP; Charge D	50,6	13,9	21,04	20,44	1+2		363	D5	12,0%	0,364
6	Fichte	KP; Charge D	47,8	12,3	21,26	20,46	1+2		322	D6	12,0%	0,396
7	Fichte	KP; Charge D	44,7	10,9	21,38	20,40	1		284	D7	12,0%	0,491
8	Fichte	KP; Charge D	57,4	14,1	20,38	20,31	1+2		366	D8	12,0%	0,392
9	Fichte	KP; Charge D	48,2	13,5	21,33	20,20	1		350	D9	12,0%	0,466
10	Fichte	KP; Charge D	51,2	13,5	20,95	20,31	1		352	D10	12,0%	0,397
11							<div>Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP</div>					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

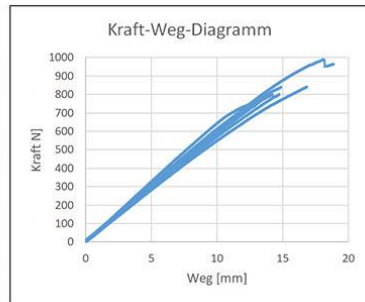
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

Prüfprotokoll, Reihe A Zyklus					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
27.03.2019	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15*	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	KZV I-15 (ohne Zyklus)	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean} ***	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	55,4	45,8	0,449

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

*** arithmetisches Mittel

* = in
Anlehnung an



System					
	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp	Sonstiges	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge A	57,0	14,9	21,10	20,50	2)		337	A1	12,0%	0,404
2	Fichte	KP; Charge A	54,2	14,2	21,10	20,50	2)		323	A2	12,0%	0,371
3	Fichte	KP; Charge A	52,3	13,4	21,10	20,50	1)		304	A3	12,0%	0,514
4	Fichte	KP; Charge A	50,1	12,9	21,10	20,50	2)		292	A4	12,0%	0,392
5	Fichte	KP; Charge A	39,6	10,0	21,10	20,50	1)	HF	227	A5	12,0%	0,498
6	Fichte	KP; Charge A	54,3	14,7	21,10	20,50	1)		334	A6	12,0%	0,455
7	Fichte	KP; Charge A	50,7	12,6	21,10	20,50	2)		284	A7	12,0%	0,391
8	Fichte	KP; Charge A	67,1	18,9	21,10	20,50	1)		427	A8	12,0%	0,484
9	Fichte	KP; Charge A	57,1	16,8	21,10	20,50	1)		381	A9	12,0%	0,505
10	Fichte	KP; Charge A	55,6	13,5	21,10	20,50	1)		306	A10	12,0%	0,471
11							Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

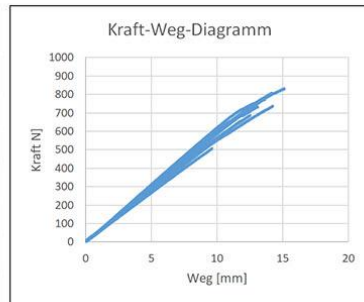
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

Prüfprotokoll, Reihe B Zyklus					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
27.03.2019	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15*	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	5 x u = 0% - u = 20%	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean} ***	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	51,1	42,6	0,438

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

*** arithmetisches Mittel

* = in
Anlehnung an



System				
	l ₄ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n
	600	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$			



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp	Sonstiges	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge A	49,8	13,1	21,10	20,50	2)		297	A1	12,0%	0,393
2	Fichte	KP; Charge A	54,8	14,2	21,10	20,50	2)		321	A2	12,0%	0,381
3	Fichte	KP; Charge A	44,5	11,8	21,10	20,50	1)		267	A3	12,0%	0,446
4	Fichte	KP; Charge A	50,0	14,2	21,10	20,50	2)		322	A4	12,0%	0,396
5	Fichte	KP; Charge A	36,8	9,9	21,10	20,50	1)	HF	224	A5	12,0%	0,498
6	Fichte	KP; Charge A	46,6	12,5	21,10	20,50	1)		284	A6	12,0%	0,435
7	Fichte	KP; Charge A	52,4	13,6	21,10	20,50	2)		309	A7	12,0%	0,382
8	Fichte	KP; Charge A	56,4	15,1	21,10	20,50	1)		343	A8	12,0%	0,451
9	Fichte	KP; Charge A	34,5	9,6	21,10	20,50	1)	HF	218	A9	12,0%	0,500
10	Fichte	KP; Charge A	54,1	14,2	21,10	20,50	1)		323	A10	12,0%	0,493
11							Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

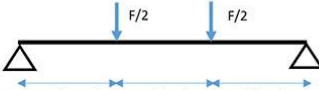
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

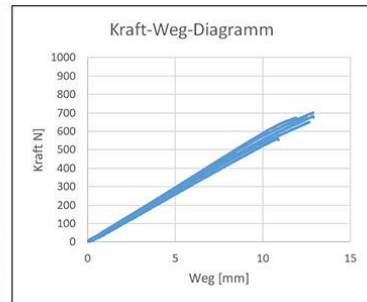
Prüfprotokoll, Reihe C Zyklus					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
03.05.2019	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15*	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	10 x u = 0% - u = 20%	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean} ***	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	44,2	34,1	0,438

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

*** arithmetisches Mittel

* = in
Anlehnung an

System					
	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n	
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp	Sonstiges	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge A	44,1	12,7	21,10	20,50	3)		287	A1	12,0%	0,393
2	Fichte	KP; Charge A	47,6	12,9	21,10	20,50	3)		294	A2	12,0%	0,381
3	Fichte	KP; Charge A	35,7	9,5	21,10	20,50	1)		215	A3	12,0%	0,446
4	Fichte	KP; Charge A	46,2	12,9	21,10	20,50	3)		292	A4	12,0%	0,396
5	Fichte	KP; Charge A	43,0	12,2	21,10	20,50	1)		275	A5	12,0%	0,498
6	Fichte	KP; Charge A	45,8	12,5	21,10	20,50	1)		283	A6	12,0%	0,435
7	Fichte	KP; Charge A	45,6	11,9	21,10	20,50	3)		270	A7	12,0%	0,382
8	Fichte	KP; Charge A	38,2	10,9	21,10	20,50	2)	Fehler KP	247	A8	12,0%	0,451
9	Fichte	KP; Charge A	32,9	8,5	21,10	20,50	1)		192	A9	12,0%	0,500
10	Fichte	KP; Charge A	50,5	13,1	21,10	20,50	1)		303	A10	12,0%	0,493
11							Bruchtyp 1) NQ Fichte 2) KZV: Klebfuge 3) NQ KP					
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

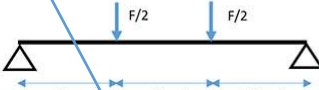
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

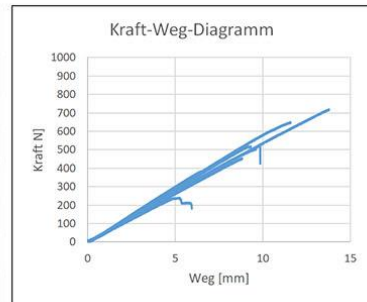
Prüfprotokoll, Reihe D Zyklus					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-15, u = 12 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
29.04.2019	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 15*	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12 % Holzfeuchte	15 Zyklen von u = 0% - >30%	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean} ***	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	2,3 mm/min	Deho / Röver	34,6	24,4	0,449

*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

*** arithmetisches Mittel

* = in Anlehnung an

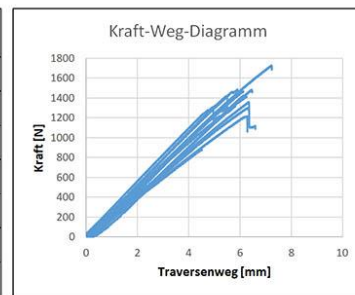
System					
	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	n	
	600	200	200	3	
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Bruchtyp	Sonstiges	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP; Charge A	34,1	9,6	21,10	20,50	2)		217	A1	12,0%	0,404
2	Fichte	KP; Charge A	35,2	9,3	21,10	20,50	2)		211	A2	12,0%	0,371
3	Fichte	KP; Charge A	30,8	8,8	21,10	20,50	1)		200	A3	12,0%	0,514
4	Fichte	KP; Charge A	35,5	9,9	21,10	20,50	2)		223	A4	12,0%	0,392
5	Fichte	KP; Charge A	41,3	11,3	21,10	20,50	1)		255	A5	12,0%	0,498
6	Fichte	KP; Charge A	48,7	13,8	21,10	20,50	1)		312	A6	12,0%	0,455
7	Fichte	KP; Charge A	44,0	11,6	21,10	20,50	2)		262	A7	12,0%	0,391
8	Fichte	KP; Charge A	16,2	5,9	21,10	20,50	3)	Versagen KP	135	A8	12,0%	0,484
9	Fichte	KP; Charge A	26,0	6,6	21,10	20,50	1)	Längsris in PK	149	A9	12,0%	0,505
10	Fichte	KP; Charge A	41,0	10,5	21,10	20,50	1)		238	A10	12,0%	0,471
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

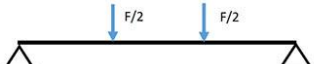
Bruchtyp
1) NQ Fichte
2) KZV: Klebfuge
3) NQ KP

Prüfprotokoll, Reihe C,r1					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-20, u = 0%				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
23.02.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 20	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 0% Holzfeuchte	Prüfung bei u = 0%	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	1,5 mm/min	Deho	81,7	59,2	0,502



*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

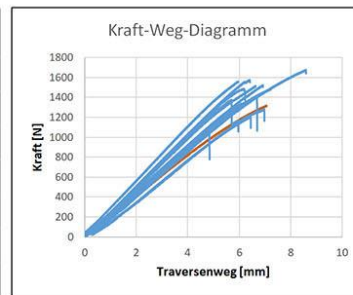
* = in
Anlehnung an

System					
	l_3 [mm]	l_2 [mm]	l_1 [mm]	l_3 [mm]	n
	300	100	100	100	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b _{fi} [mm]	h _{fi} [mm]	b _{kp} [mm]	h _{kp} [mm]	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP	71,9	6,3	22,95	14,89	22,95	14,89	252	C1	0,16%	0,450
2	Fichte	KP	81,8	6,6	22,80	14,80	22,80	14,80	264	C8	0,60%	0,558
3	Fichte	KP	51,7	4,5	23,04	14,91	23,04	14,91	181	C9	0,72%	0,462
4	Fichte	KP	104,2	7,3	22,93	14,74	22,93	14,74	290	C10	0,45%	0,625
5	Fichte	KP	83,0	6,3	22,92	14,94	22,92	14,94	250	C11	0,47%	0,529
6	Fichte	KP	86,5	6,2	23,01	14,87	23,01	14,87	245	C1.3	0,52%	0,560
7	Fichte	KP	77,5	6,4	22,82	14,86	22,82	14,86	253	C1.4	0,18%	0,452
8	Fichte	KP	89,3	5,9	22,63	14,86	22,63	14,86	237	C1.9	0,00%	0,566
9	Fichte	KP	79,0	5,8	22,65	14,89	22,65	14,89	233	C1.10	0,13%	0,534
10	Fichte	KP	86,5	5,6	22,67	14,74	22,67	14,74	221	C1.11	0,00%	0,585
11	Fichte	KP	90,2	6,6	22,48	14,82	22,48	14,82	259	C1.8	0,19%	
12	Fichte	KP	82,5	6,2	22,41	14,87	22,41	14,78	248	C1.13	0,00%	0,511
13	Fichte	KP	79,7	5,5	22,63	14,75	22,63	14,75	220	B1	0,12%	0,593
14	Fichte	KP	79,3	5,3	22,87	14,74	22,87	14,74	208	C2.12	0,12%	0,603
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Prüfprotokoll, Reihe C,r2					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-20, u = 7,2%				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
21.02.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 20	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 7,2% Holzfeuchte	Prüfung bei u = 7,2%	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	p _{mittel}
Bruch	1,5 mm/min	Deho	79,0	60,7	0,545



*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

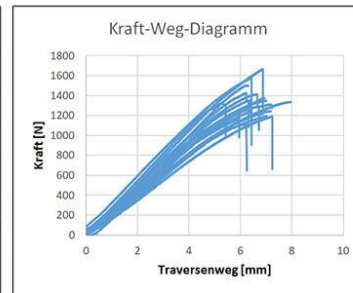
* = in
Anlehnung an

System					
	l_4 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n	
	300	100	100	100	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter										
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b _{ei} [mm]	h _{ei} [mm]	b _{kp} [mm]	h _{kp} [mm]	Zeit [s]	Bezeichnung Holzfeuchte u Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP	73,2	7,1	23,70	15,10			283	C1 7,42% 0,450
2	Fichte	KP	93,9	8,6	23,56	15,08			344	C5 7,11% 0,590
3	Fichte	KP	68,9	6,5	23,27	15,03			247	C6 7,14% 0,470
4	Fichte	KP	84,6	7,3	23,28	15,03			289	C7 7,19% 0,592
5	Fichte	KP	87,5	6,7	23,00	15,03			266	C10 6,89% 0,625
6	Fichte	KP	73,4	5,9	23,18	15,07			234	C11 7,32% 0,529
7	Fichte	KP	79,3	6,7	23,38	15,10			268	C1.5 6,87% 0,460
8	Fichte	KP	59,5	4,8	23,22	15,10			194	C1.7 7,37% 0,509
9	Fichte	KP	85,5	7,0	23,46	15,10			277	C1.10 7,70% 0,534
10	Fichte	KP	89,2	6,0	22,90	15,13			238	C1.11 7,76% 0,585
11	Fichte	KP	71,7	7,0	23,35	15,16			279	C1.12 7,51% 0,517
12	Fichte	KP	77,6	6,0	23,40	15,08			239	C2.6 6,78% 0,519
13	Fichte	KP	83,8	6,3	23,40	15,09			249	C2.8 7,13% 0,598
14	Fichte	KP	90,0	6,4	23,10	15,09			257	C2.12 7,05% 0,603
15	Fichte	KP	67,4	4,9	23,50	15,06			194	B1 7,33% 0,593
16										
17										
18										
19										
20										

Prüfprotokoll, Reihe C,r3					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-20, u = 12,4 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.02.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 20	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12,4 % Holzfeuchte	Prüfung bei u = 12,4 %	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	p _{mittel}
Bruch	1,5 mm/min	Deho	73,8	60,6	0,517



*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

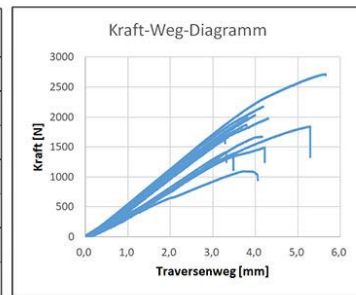
* = in
Anlehnung an

System					
	l_4 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	n	
	300	100	100	100	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b _{ri} [mm]	h _{ri} [mm]	b _{kp} [mm]	h _{kp} [mm]	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP	74,4	8,0	23,54	15,14	23,54	15,23	319	C1	12,87%	0,450
2	Fichte	KP	86,0	6,4	23,77	15,23	23,60	15,27	257	C2	12,69%	0,611
3	Fichte	KP	65,5	7,0	23,63	15,24	23,64	15,24	281	C4	9,48%	0,431
4	Fichte	KP	77,5	6,7	23,55	15,25	23,65	15,26	269	C5	12,84%	0,586
5	Fichte	KP	68,5	6,5	23,62	15,21	23,50	15,18	258	C6	13,14%	0,461
6	Fichte	KP	70,1	6,9	23,66	14,91	23,57	15,20	275	C8	13,03%	0,511
7	Fichte	KP	65,8	7,2	23,62	15,18	23,66	15,18	290	C9	13,37%	0,441
8	Fichte	KP	73,3	5,4	23,69	15,18	23,66	15,22	217	C1.2	12,61%	0,582
9	Fichte	KP	63,8	6,3	23,60	15,22	23,57	15,19	250	C1.5	13,12%	0,455
10	Fichte	KP	75,3	7,0	23,74	15,22	23,76	15,24	278	C1.7	13,08%	0,493
11	Fichte	KP	67,4	7,2	23,78	15,28	23,71	15,23	287	C1.12	12,71%	0,483
12	Fichte	KP	71,4	7,3	23,81	15,22	23,71	15,20	289	C1.13	12,63%	0,512
13	Fichte	KP	68,3	5,9	23,53	15,26	23,60	15,12	238	C2.9	12,50%	0,491
14	Fichte	KP	74,1	6,4	23,73	15,19	23,73	15,17	256	C2.11	12,50%	0,539
15	Fichte	KP	79,4	6,3	23,52	15,15	23,53	15,16	253	B1	11,83%	0,595
16	Fichte	KP	73,0	7,1	23,74	15,28	23,81	15,15	280	C2.2	11,97%	0,487
17	Fichte	KP	90,7	6,9	23,72	15,25	23,60	15,27	275	C1.11	12,11%	0,585
18	Fichte	KP	84,5	6,4	23,47	15,08	23,48	15,08	252	B2	10,92%	0,599
19												
20												

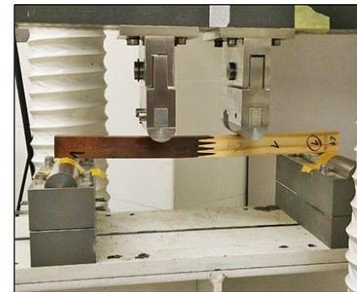
Prüfprotokoll, Reihe C,r4					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, KZV I-20, u = 12,8 %				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
28.02.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-KP; KZV I 20	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	u = 12,8 % Holzfeuchte	Prüfung bei u = 12,76% HK	DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{m,mean}	f _{m,k}	P _{mittel}
Bruch	0,75 mm/min	Deho	67,1	50,4	0,545



*Bakelite PF 0283 HL + Bakelite PFH 018

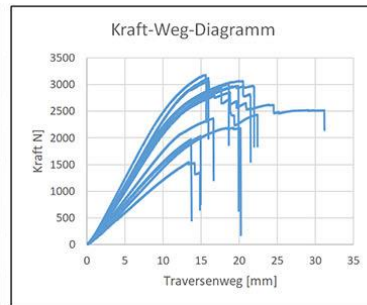
* = in
Anlehnung an

System					
	l ₂ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	n	
	300	100	100	100	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter										
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Traversenweg [N/mm²]	b _{ei} [mm]	h _{ei} [mm]	b _{kp} [mm]	h _{kp} [mm]	Zeit [s]	Bezeichnung Holzfeuchte u Dichte [g/cm³]
1	Fichte	KP	62,0	4,3	15,17	21,80			338	C1 13,21% 0,454
2	Fichte	KP	72,7	4,1	15,25	23,46			320	C2 12,54% 0,621
3	Fichte	KP	64,5	5,3	15,31	23,67			424	C4 13,15% 0,451
4	Fichte	KP	59,1	3,6	15,13	21,68			285	C7 12,92% 0,602
5	Fichte	KP	97,6	5,7	15,25	23,40			453	C1.2 12,67% 0,582
6	Fichte	KP	66,7	3,8	15,17	23,55			304	C1.3 12,75% 0,558
7	Fichte	KP	55,4	3,5	15,23	21,95			279	C1.4 12,86% 0,437
8	Fichte	KP	76,4	4,2	15,24	23,68			335	C1.9 12,85% 0,575
9										
10	Fichte	KP	69,6	3,9	15,18	23,79			306	C2.12 12,86% 0,603
11	Fichte	KP	69,5	4,4	15,17	23,74			344	C2.2 13,13% 0,576
12	Fichte	KP	67,9	4,2	15,26	22,01			334	C1.11 12,27% 0,561
13	Fichte	KP	58,8	3,3	15,26	24,03			263	B1 13,29% 0,593
14	Fichte	KP	69,7	3,8	15,10	23,75			293	B2 11,99% 0,599
15	Fichte	KP	58,7	3,4	15,22	21,81			266	x 12,46% 0,476
16										
17										
18										
19										
20										

Prüfprotokoll, Reihe E1					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-Fichte, KZV I-15				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
21.09.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-Fichte; KZV I 15		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	T-Lab	20°C; 65 rel.LF	gleiche E-Moduln der Partner		DIN 52186* DIN EN 408*
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
Bruch	2,5 mm/min	AC/AW/DR			



*Aerodux 185 mit Härter HRP 155

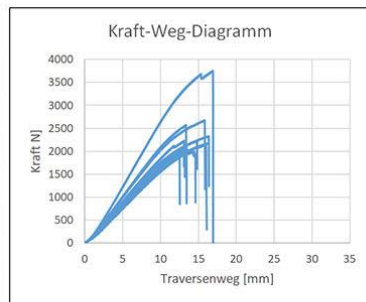
* = in
Anlehnung an

System					
	l_4 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_4 [mm]	n
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$ $\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Brettnummern		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Einstufung	Dichte- unterschied	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte min [g/cm³]
1	8	18	30,7	5171	44,00	25,60	K1	5%	311	1	12,0%	0,370
2	13	24	31,8	6745	44,00	25,80	K1	8%	356	2	12,0%	0,381
4	28	5	39,8	8381	44,03	26,03	K2	19%	328	4	12,0%	0,424
5	17	15	43,8	7743	44,03	26,11	K1	1%	484	5	12,0%	0,392
6	33	21	48,0	9407	44,02	25,96	K1	11%	399	6	12,0%	0,388
7	37	50	60,6	11906	44,20	26,00	K1	9%	448	7	12,0%	0,435
8	32	31	60,6	11614	44,04	25,85	K1	0%	373	8	12,0%	0,427
9	26	53	40,5	8227	44,15	26,15	K2	16%	249	9	12,0%	0,413
10	29	54	61,3	12064	44,09	26,12	K1	12%	358	10	12,0%	0,428
11	57	51	61,6	12543	44,10	26,04	K1	2%	520	11	12,0%	0,476
12	55	59	64,6	13939	44,10	25,90	K1	2%	261	12	12,0%	0,479
13	39	41	57,6	12007	44,02	26,00	K1	1%	373	13	12,0%	0,442
14	58	34	60,1	11862	44,08	25,98	K1	11%	366	14	12,0%	0,437
15	45	48	63,3	12839	44,02	25,95	K1	11%	266	15	12,0%	0,460
16												
17												
18												
19												
20												
21												

Prüfprotokoll, Reihe E2					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-Fichte, KZV I-15				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
21.09.2018	Dissertation Röver	4-Punkt-Biegeversuch	Fichte-Fichte; KZV I 15	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C; 65 rel.LF		DIN 52186* DIN EN 408*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
Bruch	2,5 mm/min	AC/AW/DR			



*Aerodux 185 mit Härter HRP 155

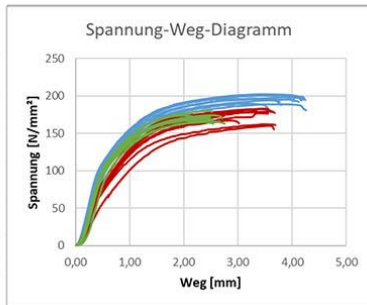
* = in
Anlehnung an

System					
	l_4 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_4 [mm]	n
	600	200	200	200	3
Formel	$E_B = \frac{(2 \times l^3 - 3 \times l \times l_1^2 + l_1^3)}{8 \times b \times h^3} \times \frac{\Delta F}{\Delta f}$				
	$\sigma_B = \frac{3 \times F \times (l - l_1)}{2 \times b \times h^2}$				



Parameter												
n	Brettnummern		Festigkeit f [N/mm²]	E-Modul [N/mm²]	b [mm]	h [mm]	Einstufung	Dichte- unterschied	Zeit [s]	Bezeichnung	Holzfeuchte u	Dichte [g/cm³]
16	2	46	44,7	9709	44,02	26,00	K2	35%	247	16	12,0%	0,353
17	14	40	43,5	9002	44,09	25,92	K2	17%	267	17	12,0%	0,377
18	11	35	41,6	8821	44,05	25,99	K2	15%	244	18	12,0%	0,434
19	1	49	43,9	8744	44,05	26,00	K2	47%	272	19	12,0%	0,347
20	4	27	39,4	8741	44,05	26,00	K2	22%	224	20	12,0%	0,357
21	3	47	47,2	9297	44,04	25,99	K2	32%	209	21	12,0%	0,355
22	12	38	47,2	9297	44,16	25,91	K2	16%	281	22	12,0%	0,381
23	20	44	32,2	8905	44,15	25,97	K1	12%	191	23	12,0%	0,402
24	16	30	43,0	9818	44,03	26,01	K1	13%	235	24	12,0%	0,380
25	6	43	42,6	9607	44,00	25,99	K2	24%	248	25	12,0%	0,362
26	19	42	47,4	9611	44,04	26,07	K1	11%	266	26	12,0%	0,401
27	23	36	47,1	9290	44,06	26,08	K1	7%	286	27	12,0%	0,413
28	25	56	53,9	11190	44,09	25,99	K2	15%	281	28	12,0%	0,417
29	10	60	45,0	10402	44,07	25,99	K2	35%	245	29	12,0%	0,366
30	52	22	51,9	11268	44,12	26,02	K2	17%	274	30	12,0%	0,405
31	62	63	75,8	14417	44,02	26,13	K1	1%	318	31	12,0%	0,539
32												
33												
34												
35												

Prüfprotokoll D1 und D2					
Thema	Druckfestigkeit KP BE335-1				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
06.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Druckfestigkeit	KP BE 335-1	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60 (200kN)	-		DIN 52185 *	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{c,k} [67/33]	f _{c,k} [50/50]	
25% Lastabf.	0,72 mm /min	Deutsche Holzveredelung	187,0	157,1	



System	
Formel	$\sigma_c = \frac{F_{max}}{b \cdot t}$

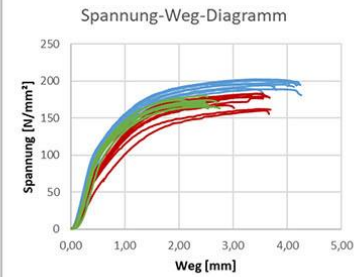


Parameter												
n	Material	p [g/cm³]	f _c [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	h [mm]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	f _{c,mittel} **	Bruch	m [g]	Bezeichnung
1	BE 335-1 67%L/33%Q		189,6	75,9	40	20	20	267	197,05	Knicken der Längsfurniere		D1.1
2	BE 335-1 67%L/33%Q		195,1	78,0	40	20	20	325		Knicken der Längsfurniere		D1.2
3	BE 335-1 67%L/33%Q		196,3	78,5	40	20	20	267		Knicken der Längsfurniere		D1.3
4	BE 335-1 67%L/33%Q		196,4	78,6	40	20	20	298		Knicken der Längsfurniere		D1.4
5	BE 335-1 67%L/33%Q		188,8	75,5	40	20	20	317		Knicken der Längsfurniere		D1.5
6	BE 335-1 67%L/33%Q		201,6	80,6	40	20	20	315		Knicken der Längsfurniere		D1.6
7	BE 335-1 67%L/33%Q		201,6	80,6	40	20	20	296		Knicken der Längsfurniere		D1.7
8	BE 335-1 67%L/33%Q		197,9	79,2	40	20	20	325		Knicken der Längsfurniere		D1.8
9	BE 335-1 67%L/33%Q		202,1	80,9	40	20	20	284		Knicken der Längsfurniere		D1.9
10	BE 335-1 67%L/33%Q		201,1	80,5	40	20	20	310		Knicken der Längsfurniere		D1.10
11	BE 335-1 50%L/50%Q		160,1	64,0	40	20	20	294	174,17	Knicken der Längsfurniere		D2.1
12	BE 335-1 50%L/50%Q		162,1	64,8	40	20	20	287		Knicken der Längsfurniere		D2.2
13	BE 335-1 50%L/50%Q		173,0	69,2	40	20	20	227		Knicken der Längsfurniere		D2.3
14	BE 335-1 50%L/50%Q		180,0	72,0	40	20	20	275		Knicken der Längsfurniere		D2.4
15	BE 335-1 50%L/50%Q		176,7	70,7	40	20	20	284		Knicken der Längsfurniere		D2.5
16	BE 335-1 50%L/50%Q		167,2	66,9	40	20	20	237		Knicken der Längsfurniere		D2.6
17	BE 335-1 50%L/50%Q		182,8	73,1	40	20	20	287		Knicken der Längsfurniere		D2.7
18	BE 335-1 50%L/50%Q		178,4	71,4	40	20	20	277		Knicken der Längsfurniere		D2.8
19	BE 335-1 50%L/50%Q		179,0	71,6	40	20	20	295		Knicken der Längsfurniere		D2.9
20	BE 335-1 50%L/50%Q		182,4	73,0	40,00	20	20	284		Knicken der Längsfurniere		D2.10

**= arithmetisches Mittel

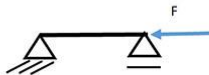
Prüfprotokoll D3

Thema	Druckfestigkeit KP BE335-1				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
06.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Druckfestigkeit	KP BE 335-1		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Bau 60 (200kN)	-	33%/67%Q		DIN 52185 *
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{0,k} [33/67]		
25% Lastabf.	0,72 mm /min	Deutsche Holzveredelung	161,3		



* in
Anlehnung

System



Formel

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{[b*t]}$$

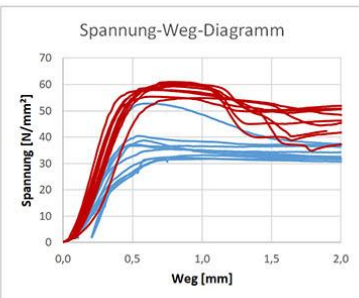


Parameter

[illegible]

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll D4 und D5					
Thema	Druckfestigkeit KP BE335-1 (Referenz)				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
06.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Druckfestigkeit $f_{c,0}$	Buche (D5) und Fichte (D4)	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Bau 60 (200kN)	$u = 12\%$	$p_{FI} = 0,387; p_{BU} = 0,655 \text{ [g/cm}^3\text{]}$		DIN 52185 *
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{c,k}$ [Fichte]	$f_{c,k}$ [Buche]	
25% Lastabf.	0,38 (Fi) ; 0,61 (Bu) mm /min	Deutsche Holzveredelung	26,5	53,5	



System	
Formel	$\sigma_c = \frac{F_{max}}{[b \cdot t]}$



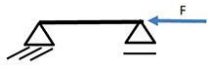
Parameter												
n	Material	$\rho \text{ [g/cm}^3\text{]}$	$f_{c,0} \text{ [N/mm}^2\text{]}$	Tragfähigkeit [kN]	h [mm]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	$f_{c,mittel}^{**}$	Bruch	m [g]	Bezeichnung
1	BE 335-1 67%L/33%Q	0,340	32,1	12,8	40,5	20,0	20,0	106	36,62	Knicken der Fasern	5,5	D4.1
2	BE 335-1 67%L/33%Q	0,353	31,4	12,7	40,5	20,5	19,8	234		Knicken der Fasern	5,8	D4.2
3	BE 335-1 67%L/33%Q	0,372	32,4	12,9	40,3	20,0	20,0	123		Knicken der Fasern	6,0	D4.3
4	BE 335-1 67%L/33%Q	0,388	39,7	16,2	39,8	20,0	20,4	85		Knicken der Fasern	6,3	D4.4
5	BE 335-1 67%L/33%Q	0,374	36,5	14,9	39,8	20,0	20,5	80		Knicken der Fasern	6,1	D4.5
6	BE 335-1 67%L/33%Q	0,498	51,8	21,1	38,9	20,5	19,9	101		Knicken der Fasern	7,9	D4.6
7	BE 335-1 67%L/33%Q	0,376	36,2	14,7	40,0	20,3	20,0	89		Knicken der Fasern	6,1	D4.7
8	BE 335-1 67%L/33%Q	0,418	35,2	14,2	40,3	20,0	20,2	121		Knicken der Fasern	6,8	D4.8
9	BE 335-1 67%L/33%Q	0,390	38,4	15,5	40,0	20,0	20,2	91		Knicken der Fasern	6,3	D4.9
10	BE 335-1 67%L/33%Q	0,364	32,8	13,3	40,1	20,0	20,2	159		Knicken der Fasern	5,9	D4.10
11	BE 335-1 50%L/50%Q	0,686	57,2	23,2	40,6	20,0	20,3	65	57,55	Knicken der Fasern	11,3	D5.1
12	BE 335-1 50%L/50%Q	0,631	58,4	23,7	41,0	20,0	20,3	79		Knicken der Fasern	10,5	D5.2
13	BE 335-1 50%L/50%Q	0,643	59,9	24,0	40,8	20,0	20,0	81		Knicken der Fasern	10,5	D5.3
14	BE 335-1 50%L/50%Q	0,640	54,0	21,9	40,0	20,0	20,3	99		Knicken der Fasern	10,4	D5.4
15	BE 335-1 50%L/50%Q	0,653	54,6	22,2	40,0	20,0	20,3	63		Knicken der Fasern	10,6	D5.5
16	BE 335-1 50%L/50%Q	0,670	58,4	24,0	40,4	20,2	20,3	81		Knicken der Fasern	11,1	D5.6
17	BE 335-1 50%L/50%Q	0,631	59,2	24,4	40,8	20,5	20,1	75		Knicken der Fasern	10,6	D5.7
18	BE 335-1 50%L/50%Q	0,662	58,8	24,1	40,5	20,2	20,3	81		Knicken der Fasern	11,0	D5.8
19	BE 335-1 50%L/50%Q	0,677	58,5	23,7	40,0	20,0	20,3	83		Knicken der Fasern	11,0	D5.9
20	BE 335-1 50%L/50%Q	0,659	56,6	23,2	40,7	20,2	20,3	71		Knicken der Fasern	11,0	D5.10

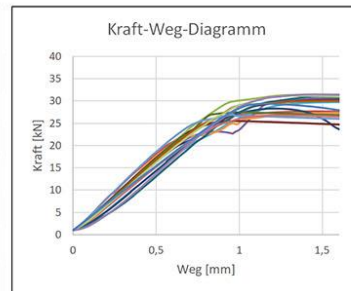
**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll Reihe KZV Druck					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte-KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
30.05.2017	Dissertation Röver	Druckversuch	Fichte	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%; u = 12%	P = 100%; V = 100%	DIN 52185**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{c,i} mittel	f _{c,i,k}	p mittel
25% Lastabf..	0,44 mm/min	Deutsche Holzveredelung	48,4	42,2	541,8

*BAKELITE PF 0283 HL + BAKELITE PFH 018

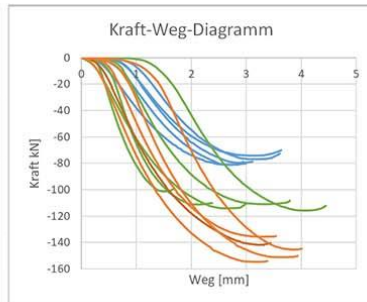
** in Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper		Festigkeit f [N/mm²]	Emodul [N/mm²]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Bruch	V [mm/min]	Dichte [kg/m³]	Bezeichnung	sonstiges
1												
2												
3	Fichte	KP	51,0	-	40,00	15,00	240	KZV Druckfalte	0,44	570,4	KZV-D3	
4	Fichte	KP	49,6	-	40,00	15,00	231	KZV Druckfalte	0,44	546,4	KZV-D4	
5	Fichte	KP	45,9	-	40,00	15,00	286	KZV Druckfalte	0,44	579,0	KZV-D5	
6	Fichte	KP	47,2	-	40,00	15,00	170	KZV Druckfalte	0,44	509,0	KZV-D6	
7	Fichte	KP	42,5	-	40,00	15,00	113	KZV Druckfalte	0,44	501,4	KZV-D7	
8	Fichte	KP	45,8	-	40,00	15,00	141	KZV Druckfalte	0,44	498,9	KZV-D8	
9	Fichte	KP	50,4	-	40,00	15,00	250	KZV Druckfalte	0,44	570,5	KZV-D9	
10	Fichte	KP	51,7	-	40,00	15,00	205	KZV Druckfalte	0,44	562,7	KZV-D10	
11	Fichte	KP	50,1	-	40,00	15,00	228	KZV Druckfalte	0,44	566,4	KZV-D11	
12	Fichte	KP	45,0	-	40,00	15,00	182	KZV Druckfalte	0,44	488	KZV-D12	
13	Fichte	KP	44,7	-	40,00	15,00	198	KZV Druckfalte	0,44	521,46	KZV-D13	
14	Fichte	KP	52,0	-	40,00	15,00	201	KZV Druckfalte	0,44	568,71	KZV-D14	
15	Fichte	KP	52,5	-	40,00	15,00	31	KZV Druckfalte	0,44	580,43	KZV-D15	
16	Fichte	KP	49,0	-	40,00	15,00	193	KZV Druckfalte	0,44	521,10	KZV-D16	
17												
18												
19												
20												

Prüfprotokoll Reihe LLD 20 - 40					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
13.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Druck)	KP BE 335-1 67%L/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60 (200kN)	-		DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{h,k} [d = 20 mm]	f _{h,k} [d = 30 mm]	f _{h,k} [d = 40 mm]
25% Lastabf.	1,35 mm /min	Deutsche Holzveredelung	237,8	216,1	213,4



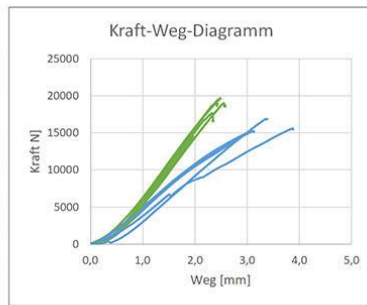
System		* in Anlehnung
Formel	$\sigma_c = \frac{F_{max}}{b \cdot t} \quad \sigma_h = \frac{F_{max}}{d \cdot t}$	



Parameter												
n	d [mm]	Randabstand [mm]	NQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	f _{h,mittel} **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	20	220	88,4	265,3	79,6	60	15	130	261,84	Querzug		LLD20-1
2	20	220	85,4	256,1	76,8	60	15	149		Querzug		LLD20-2
3	20	220	82,4	247,2	74,2	60	15	153		Querzug		LLD20-3
4	20	220	90,1	270,2	81,1	60	15	135		Querzug		LLD20-4
5	20	220	90,1	270,4	81,1	60	15	142		Querzug		LLD20-5
6	30	220	75,0	225,1	101,3	90	15	136	245,82	Querzug		LLD30-1
7	30	220	82,3	247,0	111,1	90	15	190		Querzug		LLD30-2
8	30	220	85,7	257,1	115,7	90	15	222		Querzug		LLD30-3
9	30	220	84,5	253,5	114,1	90	15	152		Querzug		LLD30-4
10	30	220	82,1	246,4	110,9	90	15	184		Querzug		LLD30-5
11	40	220	78,8	236,3	141,8	120	15	196	242,82	Querzug		LLD40-1
12	40	220	80,8	242,3	145,4	120	15	208		Querzug		LLD40-2
13	40	220	85,9	257,7	154,6	120	15	189		Querzug		LLD40-3
14	40	220	83,9	251,8	151,1	120	15	203		Querzug		LLD40-4
15	40	220	75,3	225,9	135,6	120	15	190		Querzug		LLD40-5
16												
17												
18												
19												
20												

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Reine Lochleibung"					
Thema	Lochleibungsfestigkeit d = 8mm und d = 10mm				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
17.8.19.12.2018	Dissertation Röver	Zugversuch (Einzelquerschnitt)	KP BE 335-1 67%L/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 8mm & d = 10mm	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
90% Lastabf.	variiert	DR			



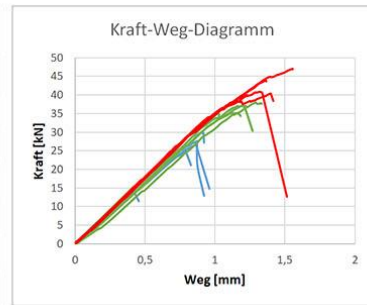
	Geometrie: a3 = 2,5d; a4 = 1,5d, t = 15 mm	** in Anlehnung
System		
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$	

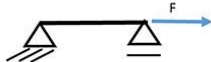


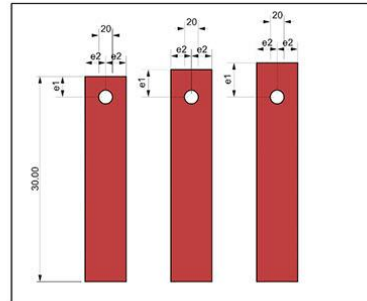
Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben-schlankeit	Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	V [mm/min]	Bezeichnung	Sonstiges
1	d10 LL1	0,67	53,1	19,12	24,00	15,00	195	18,57	16,08	0,75	d10 LL1	Schraube mit Gewinde
2	d10 LL2	0,67	46,6	16,76	24,00	15,00	268			0,50	d10 LL2	Schraube mit Gewinde
3	d10 LL3	0,67	49,2	17,70	24,00	15,00	282			0,50	d10 LL3	Schraube mit Gewinde
4	d10 LL4	0,67	52,8	19,02	24,00	15,00	311			0,50	d10 LL4	Schraube mit Gewinde
5	d10 LL5	0,67	53,1	19,10	24,00	15,00	291			0,50	d10 LL5	Schraube mit Gewinde
6	d10 LL6	0,67	54,8	19,74	24,00	15,00	299			0,50	d10 LL6	Schraube mit Gewinde
7	d8 LL1	0,53	43,4	15,62	24,00	15,00	440	15,61	14,09	0,30	d8 LL1	Schraube mit Gewinde
8	d8 LL2	0,53	42,4	15,28	24,00	15,00	269			0,40	d8 LL2	Schraube mit Gewinde
9	d8 LL3	0,53	42,2	15,18	24,00	15,00	263			0,40	d8 LL3	Schraube mit Gewinde
10	d8 LL4	0,53	41,6	14,96	24,00	15,00	258			0,40	d8 LL4	Schraube mit Gewinde
11	d8 LL5	0,53	47,0	16,91	24,00	15,00	290			0,40	d8 LL5	Schraube mit Gewinde
12	d8 LL6	0,53	43,7	15,74	24,00	15,00	283			0,40	d8 LL6	Schraube mit Gewinde
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll Reihe LLZ 20					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
14.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 67%L/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60 (200kN)	-	a3 = 1,5d - 2,5d	DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf..	variiert	Deutsche Holzveredelung			



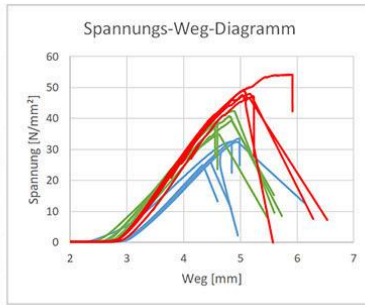
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

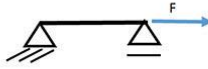


Parameter												
n	a4	a3	BQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	F _{mittel} /1cm **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	1,5d	1,5d	31,0	92,9	27,9	60	15	34	18,9	Vorholz	14,1	LLZ20-1,5d 1
2	1,5d	1,5d	30,6	91,7	27,5	60	15	49		Vorholz	2,5	LLZ20-1,5d 3
3	1,5d	1,5d	33,5	100,5	30,1	60	15	56		Vorholz	0,3	LLZ20-1,5d 4
4	1,5d	1,5d	31,8	95,5	28,7	60	15	60		Vorholz	1,0	LLZ20-1,5d 5
5	2,0d	1,5d	30,5	91,5	27,5	60	15	67		Vorholz	0,9	LLZ20-1,5d 6
6	2,0d	2,0d	44,0	131,9	39,6	60	15	75	25,4	Netto- querschnitt	4,4	LLZ20-2,0d 1
7	2,0d	2,0d	43,1	129,3	38,8	60	15	83		Vorholz	0,8	LLZ20-2,0d 2
8	2,0d	2,0d	42,1	126,2	37,8	60	15	87		Vorholz	0,7	LLZ20-2,0d 3
9	2,0d	2,0d	40,3	120,8	36,2	60	15	66		Vorholz	0,8	LLZ20-2,0d 4
10	2,0d	2,0d	42,2	126,5	37,9	60	15	85		Vorholz	0,8	LLZ20-2,0d 5
11	1,5d	2,5d	46,6	139,7	41,9	60	15	95	29,8	Netto- querschnitt	1,5	LLZ20-2,5d 1
12	1,5d	2,5d	48,8	146,3	43,9	60	15	91		Netto- querschnitt	0,0	LLZ20-2,5d 2
13	1,5d	2,5d	53,4	160,1	48,0	60	15	99		Netto- querschnitt	1,0	LLZ20-2,5d 3
14	1,5d	2,5d	45,6	136,9	41,1	60	15	82		Netto- querschnitt	1,1	LLZ20-2,5d 4
15	1,5d	2,5d	49,2	147,6	44,3	60	15	92		Netto- querschnitt	3,4	LLZ20-2,5d 5
16	1,5d	2,5d	54,1	162,4	48,7	60	15	94		Netto- querschnitt	4,8	LLZ20-2,5d 6
17												
18												
19												
20												

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll Reihe LLZ 30					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
30.01.2018	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab (50kN)	-	a3 = 1,5d - 2,5d; a4 = 1,5d	DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	1,5 mm /min	Deutsche Holzveredelung			



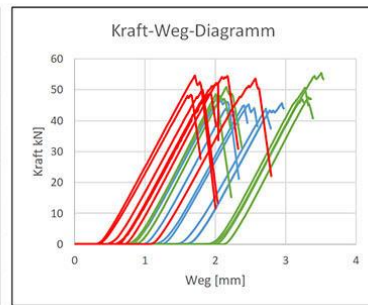
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	a4	a3	NQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	F _{mittel} /1cm **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	1,5d	1,5d	32,6	97,8	44,00	90,00	15,00	194	18,35	Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-1
2	1,5d	1,5d	33,6	100,9	45,39	90,00	15,00	200		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-2
3	1,5d	1,5d	26,9	80,6	36,26	90,00	15,00	180		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-3
4	1,5d	1,5d	32,4	97,3	43,78	90,00	15,00	199		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-4
5	1,5d	1,5d	25,0	74,9	33,71	90,00	15,00	174		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-5
6	1,5d	1,5d	28,7	86,0	38,70	90,00	15,00	187		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-6
7	1,5d	1,5d	34,90	104,7	47,11	90,00	15,00	185		Vorholz	0,22	LLZ30 1,5d-7
8	1,5d	2,0d	40,8	122,5	45,94	90,00	12,50	193	35,79	Vorholz	0,22	LLZ30 2d-1
9	1,5d	2,0d	37,9	113,7	40,26	90,00	11,80	182		Vorholz	0,22	LLZ30 2d-2
10	1,5d	2,0d	42,4	127,3	46,96	90,00	12,30	196		Vorholz	0,22	LLZ30 2d-3
11	1,5d	2,0d	39,4	118,2	43,62	90,00	12,30	194		Vorholz	0,22	LLZ30 2d-4
12	1,5d	2,0d	39,2	117,6	43,39	90,00	12,30	184		Vorholz	0,22	LLZ30 2d-5
13	1,5d	2,0d	38,9	116,6	41,27	90,00	11,80	182		Vorholz	0,22	LLZ30 2d-6
14	1,5d	2,50	46,9	140,8	43,50	90,00	10,30	203	43,89	Vorholz	0	LLZ30 2,5d-1
15	1,5d	2,50	46,6	139,8	43,21	90,00	10,30	207		Netto querschnitt	0	LLZ30 2,5d-2
16	1,5d	2,50	49,3	148,0	45,72	90,00	10,30	210		Netto querschnitt	0	LLZ30 2,5d-3
17	1,5d	2,50	47,6	142,8	43,48	90,00	10,15	204		Netto querschnitt	0	LLZ30 2,5d-4
18	1,5d	2,50	54,2	162,5	49,73	90,00	10,20	248		Vorholz	0	LLZ30 2,5d-5
19	1,5d	2,50	47,9	143,8	44,66	90,00	10,35	207		Netto querschnitt	0	LLZ30 2,5d-6
20												

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll Reihe LLZ 40					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
14.06.2016	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 67%L/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60 (200kN)	-	a3 = 1,5d - 2,5d	DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	variiert	Deutsche Holzveredelung			



System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

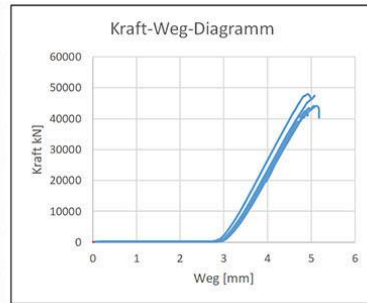


Parameter												
n	a4	a3	NQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	F _{mittel} /1cm **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	1,5d	1,5d	25,9	77,6	46,55	120	15	80	30,0	Vorholz		LLZ40/1,5d:2
2	1,5d	1,5d	24,4	73,2	43,94	120	15	95		Netto- querschnitt		LLZ40/1,5d:3
3	1,5d	1,5d	24,3	73,0	43,81	120	15	82		Netto- querschnitt		LLZ40/1,5d:4
4	1,5d	1,5d	25,0	75,0	44,97	120	15	88		Netto- querschnitt		LLZ40/1,5d:5
5	1,5d	1,5d	25,4	76,1	45,66	120	15	104		Vorholz		LLZ40/1,5d:6
6	1,5d	1,5d	25,2	75,6	45,34	120	15	90		Netto- querschnitt		LLZ40/1,5d:7
7	1,5d	2,0d	30,8	92,4	55,47	120	15	129	33,2	Netto- querschnitt		LLZ40/2d:1
8	1,5d	2,0d	26,5	79,4	47,64	120	15	119		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:2
9	1,5d	2,0d	26,1	78,4	47,02	120	15	118		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:3
10	1,5d	2,0d	27,0	80,9	48,56	120	15	80		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:4
11	1,5d	2,0d	28,2	84,5	50,71	120	15	116		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:5
12	1,5d	2,0d	28,3	84,9	50,95	120	15	83		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:6
13	1,5d	2,0d	26,8	80,4	48,21	120	15	78		Netto- querschnitt		LLZ40/2d:7
14	1,5d	2,5d	27,3	81,8	49,10	120	15	74	34,5	Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:1
15	1,5d	2,5d	26,9	80,7	48,44	120	15	64		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:2
16	1,5d	2,5d	30,3	91,0	54,60	120	15	66		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:3
17	1,5d	2,5d	29,8	89,3	53,60	120	15	96		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:4
18	1,5d	2,5d	27,9	83,6	50,14	120	15	69		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:5
19	1,5d	2,5d	30,2	90,7	54,45	120	15	83		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:6
20	1,5d	2,5d	0,0	87,0	52,23	120	15	77		Netto- querschnitt		LLZ40/2,5d:7

**= arithmetisches Mittel

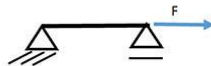
Prüfprotokoll Reihe LLZ 50

Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
15.02.2018	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab (200kN)	-	a3 = 1,5d	DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	variiert	Deutsche Holzveredelung			



* in
Anlehnung

System



Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

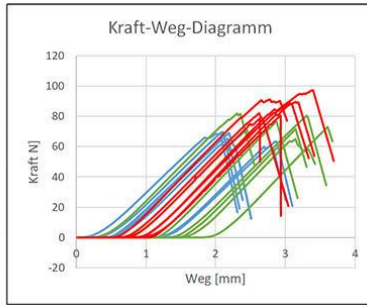


Parameter

[illegible]

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll Reihe LLZ 60					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5 d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
26.10.2016	Forschungsprojekt Deho	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 67%/33%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	Halle 60 (200 kN)	-	a3 = 1,5d - 2,5d		DIN EN 383*
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller			
25% Lastabf.	1,5 mm /min	Deutsche Holzveredelung			



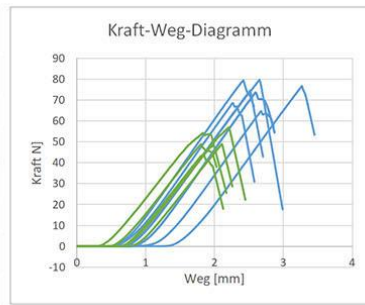
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

* in Anlehnung



Parameter												
n	a4	a3	NQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	F _{mittel} /1cm **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	1,5d	1,5d	24,3	72,8	65,50	180,00	15,00	80	44,07	Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-1
2	1,5d	1,5d	25,5	76,4	68,73	180,00	15,00	82		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-2
3	1,5d	1,5d	25,8	77,5	69,73	180,00	15,00	79		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-3
4	1,5d	1,5d	22,6	67,7	60,95	180,00	15,00	93		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-4
5	1,5d	1,5d	25,6	76,7	69,07	180,00	15,00	81		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-5
6	1,5d	1,5d	24,2	72,6	65,32	180,00	15,00	79		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-6
7	1,5d	1,5d	23,5	70,5	63,46	180,00	15,00	101		Netto querschnitt	0	LLZ60 1,5d-7
8	1,5d	2,0d	29,8	89,4	80,45	180,00	15,00	121	49,52	Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-1
9	1,5d	2,0d	30,3	91,0	81,92	180,00	15,00	90		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-2
10	1,5d	2,0d	26,5	79,5	71,52	180,00	15,00	116		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-3
11	1,5d	2,0d	27,1	81,2	73,06	180,00	15,00	130		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-4
12	1,5d	2,0d	26,5	79,4	71,44	180,00	15,00	92		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-5
13	1,5d	2,0d	28,4	85,1	76,58	180,00	15,00	108		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-6
14	1,5d	2,50	24,1	72,2	64,99	180,00	15,00	115		Netto querschnitt	0	LLZ60 2d-7
15	1,5d	2,50	33,8	101,3	91,21	180,00	15,00	109	57,86	Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-1
16	1,5d	2,50	32,8	98,3	88,47	180,00	15,00	119		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-2
17	1,5d	2,50	33,1	99,4	89,48	180,00	15,00	119		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-3
18	1,5d	2,50	36,0	108,1	97,26	180,00	15,00	127		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-4
19	1,5d	2,50	30,4	91,1	82,02	180,00	15,00	107		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-5
20	1,5d	2,50	29,1	87,2	78,47	180,00	15,00	102		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-6
21	1,5d	2,50	29,9	89,6	80,63	180,00	15,00	110		Netto querschnitt	0	LLZ60 2,5d-7

Prüfprotokoll Reihe LLZ 40 und LLZ 60 #					
Thema	Lochleibung KP-Kopf, a4 = 1,5d				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
25.10.2016 & 24.10.2018	Forschungsprojekt Deho / Dis DR	Lochleibungsversuch (Zug)	KP BE 335-1 50%L/50%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60 (200kN) / T-Lab (50kN)	-	a3 = 1,5d	DIN EN 383*	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t,1,mittel} **	f _{t,1,c} **	p mittel
25% Lastabf.	1,5 mm /min	Deutsche Holzveredelung			



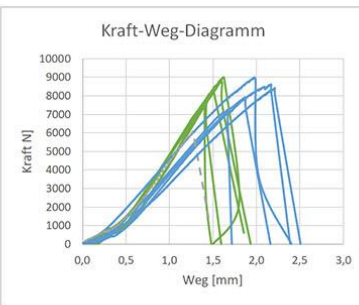
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



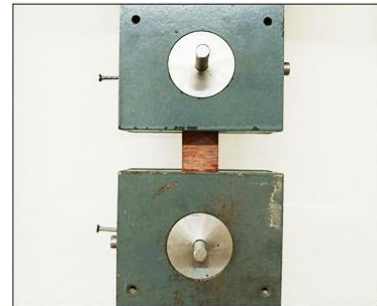
Parameter												
n	a4	a3	NQ-Festigkeit f [N/mm²]	LL-Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	z [mm]	Zeit [s]	F _{mittel} /1cm **	Bruch	Vorspannung Maschine	Bezeichnung
1	1,5d	1,5d	24,0	144,0	64,81	180,00	15,00	97	49,34	Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 1
2	1,5d	1,5d	25,4	152,6	68,68	180,00	15,00	85		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 2
3	1,5d	1,5d	28,4	170,7	76,81	180,00	15,00	119		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 3
4	1,5d	1,5d	27,6	165,9	74,64	180,00	15,00	96		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 4
5	1,5d	1,5d	27,3	163,9	73,75	180,00	15,00	96		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 5
6	1,5d	1,5d	29,5	176,8	79,55	180,00	15,00	90		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 6
7	1,5d	1,5d	29,6	177,4	79,82	180,00	15,00	98		Vorholz	0	LLZ60 (50/50) 7
8	1,5d	1,5d	27,3	109,0	49,06	120,00	15,00	84	33,54	Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 1
9	1,5d	1,5d	27,3	109,0	49,06	120,00	15,00	71		Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 2
10	1,5d	1,5d	30,2	120,8	54,35	120,00	15,00	75		Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 3
11	1,5d	1,5d	24,3	97,3	43,79	120,00	15,00	73		Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 4
12	1,5d	1,5d	31,7	126,8	57,05	120,00	15,00	84		Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 5
13	1,5d	1,5d	27,0	108,0	48,59	120,00	15,00	77		Vorholz	0	LLZ40 (50/50) 6
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

**= arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Bolzen vs. Schrauben"					
Thema	Einfluss des Gewindes auf die Tragfähigkeit				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
13.12.2018	Dissertation Röver	Zugversuch (Einzelquerschnitt)	KP BE 335-1 50%L/50%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 8 mm		DIN EN 383**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{t, mittel} Bolzen	f _{t, mittel} Schraube	Einfluß Gew.
25% Lastabf..	variiert	DR	34,5	33,8	-2%



	Geometrie: a3 = 2,5d; a4 = 1,5d, t = 10 mm	** in Anlehnung
System		
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$	

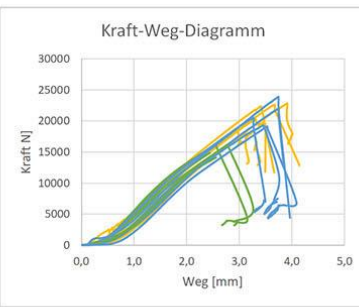


Parameter												
n	Prüfkörper	Schraubenschlankheit	Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	V [mm/min]	Bezeichnung	Sonstiges
1	B1		37,5	9,01	24,00	10,00	195	8,29	6,87	0,50	B1	Bolzen glatt
2	B2		32,0	7,67	24,00	10,00	171			0,50	B2	Bolzen glatt
3	B3		32,0	7,67	24,00	10,00	241			0,35	B3	Bolzen glatt
4	B4		36,7	8,81	24,00	10,00	276			0,35	B4	Bolzen glatt
5	B5		34,5	8,27	24,00	10,00	260			0,35	B5	Bolzen glatt
6	B6*		25,4	6,09	24,00	10,00	218			0,35	B6*	Bolzen glatt
7	M8_1		35,1	8,42	24,00	10,00	440	8,10	6,61	0,30	M8_1	Schraube mit Gewinde
8	M8_2		30,2	7,25	24,00	10,00	251			0,40	M8_2	Schraube mit Gewinde
9	M8_3		35,9	8,62	24,00	10,00	326			0,40	M8_3	Schraube mit Gewinde
10	M8_4		37,5	9,01	24,00	10,00	299			0,40	M8_4	Schraube mit Gewinde
11	M8_5		32,8	7,87	24,00	10,00	282			0,40	M8_5	Schraube mit Gewinde
12	M8_6		31,0	7,44	24,00	10,00	275			0,40	M8_6	Schraube mit Gewinde
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

* Fehler im Schichtaubau

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Verbindungsmittelschlankheit"					
Thema	Verbindungsmittelschlankheit				
Datum	Projekt	Prüfung	Material		Prüfer
14.12.2018	Dissertation Röver	Zugversuch	KP BE 335-1 50%/50%Q		DR
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten		Norm
Weg	T-Lab	20°C / 65%	Schraube M8 (8.8) ohne Vorsp.		DIN EN 408**
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	f _{vgl. λ = 1,25}	f _{vgl. λ = 2,5}	f _{vgl. λ = 3,75}
25% Lastabf..	variiert	DR	28,5	17,5	11,6



Geometrie: a3 = 2,5d; a4 = 1,5d, t = 10 mm ** in Anlehnung

System

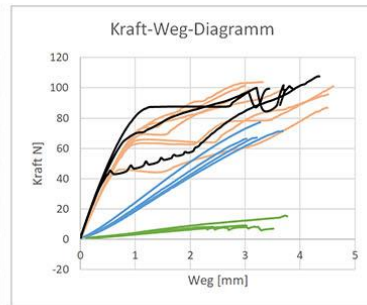
Formel

$$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$$

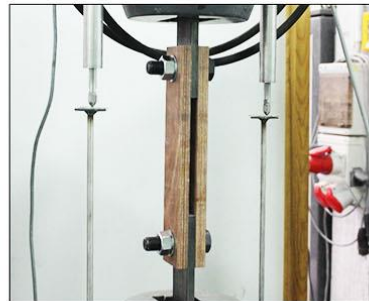

Parameter												
n	Prüfkörper	Schraubenschlankheit	Vergleichsfestigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	f _{vgl,k} [N/mm²]	V [mm/min]	sonstiges
1	1 (A/B)	1,25	32,9	15,79	24,00	10,00	263	15,90	13,66	28,46	0,60	
2	2 (A/B)	1,25	36,5	17,54	24,00	10,00	341				0,50	
3	3 (A/B)	1,25	30,8	14,78	24,00	10,00	326				0,50	
4	4 (A/B)	1,25	33,9	16,28	24,00	10,00	308				0,50	
5	5 (A/B)	1,25	30,9	14,83	24,00	10,00	307				0,50	
6	6 (A/B)	1,25	33,7	16,20	24,00	10,00	336				0,50	
7	A (1/2)	2,50	19,9	19,14	24,00	20,00	440	20,72	16,76	17,46	0,50	
8	B (1/2)	2,50	20,1	19,32	24,00	20,00	373				0,60	
9	C (1/2)	2,50	21,4	20,53	24,00	20,00	291				0,70	
10	D (1/2)	2,50	24,9	23,93	24,00	20,00	322				0,70	
11	E (1/2)	2,50	22,9	22,02	24,00	20,00	322				0,70	
12	F (1/2)	2,50	20,2	19,39	24,00	20,00	269				0,70	
13	G (1/2)	3,75	15,9	22,83	24,00	30,00	343	20,92	16,68	11,58	0,7	
14	H (1/2)	3,75	14,1	20,28	24,00	30,00	263				0,8	
15	I (1/2)	3,75	12,8	18,42	24,00	30,00	249				0,80	
16	J (1/2)	3,75	15,5	22,38	24,00	30,00	274				0,75	
17	K (1/2)	3,75	15,7	22,65	24,00	30,00	294				0,75	
18	L (1/2)	3,75	13,2	18,95	24,00	30,00	250				0,75	
19												
20												
21												
22												

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Hochfeste Schrauben 1, d = 20 mm"					
Thema	Einfluss Vorspannung bei KP-Köpfen				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
06.06.2017	Dissertation Röver	Zug; a3 = 2,0d; a4 = 1,5d	Fichte / KP BE 335-167%I/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 65%	d = 20 mm; Festigkeit 8.8	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Vorspannung	a ₃ / a ₄	t
25% Lastabf..	1 mm/min	DR	464 Nm	2,0d / 1,5d	15 mm



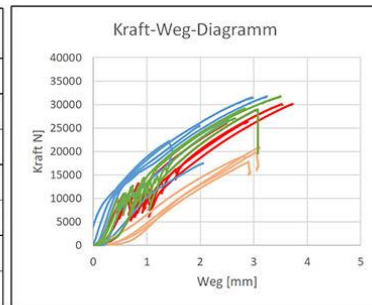
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

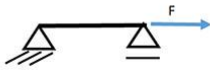


Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben-schlankheit	Vergleichsfestig-keit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	V [mm/min]	Vorspannung Maschine	Bezeichnung	Sonstiges
1	KP	1,33	56,1	101,07	60,00	15,00	316	98,2	1,00	0,0	mit Vorsp. 1	
2	KP	1,33	55,0	98,98	60,00	15,00	251		1,00	0,0	mit Vorsp. 2	
3	KP	1,33	56,5	101,69	60,00	15,00	231		1,00	0,0	mit Vorsp. 3	
4	KP	1,33	54,9	98,89	60,00	15,00	246		1,00	0,0	mit Vorsp. 4	
5	KP	1,33	53,2	95,72	60,00	15,00	327		1,00	0,0	mit Vorsp. 5	
6	KP	1,33	57,7	103,91	60,00	15,00	263	F _k [kN]	1,00	0,0	mit Vorsp. 6	
7	KP	1,33	48,3	86,95	60,00	15,00	318	85,9	1,00	0,0	mit Vorsp. 7	
8	KP	1,33	39,7	71,41	60,00	15,00	228	70,6	1,00	0,0	ohe Vorsp. 1	
9	KP	1,33	36,9	66,41	60,00	15,00	192		1,00	0,0	ohe Vorsp. 2	
10	KP	1,33	43,0	77,35	60,00	15,00	216	F _k [kN]	1,00	0,0	ohe Vorsp. 3	
11	KP	1,33	37,3	67,20	60,00	15,00	205	58,4	1,00	0,0	ohe Vorsp. 4	
12	KP	1,33	59,8	107,71	60,00	15,00	287	103,0	1,00	0,0	mit Vorsp. 8	Sandpapier-scheiben
13	KP	1,33	55,3	99,45	60,00	15,00	213	F _k [kN]	1,00	0,0	mit Vorsp. 9	Sandpapier-scheiben
14	KP	1,33	56,5	101,76	60,00	15,00	301	90,4	1,00	0,0	mit Vorsp. 10	Sandpapier-scheiben
15	Fichte	1,33	4,6	8,37	60,00	15,00	163	10,4	1,00	0,00	Fichte Referenz 1	
16	Fichte	1,33	5,2	9,27	60,00	15,00	176		1,00	0,00	Fichte Referenz 2	
17	Fichte	1,33	4,7	8,38	60,00	15,00	151	F _k [kN]	1,00	0,00	Fichte Referenz 3	
18	Fichte	1,33	8,7	15,70	60,00	15,00	210	4,5	1,00	0,00	Fichte Referenz 4	
19												
20												

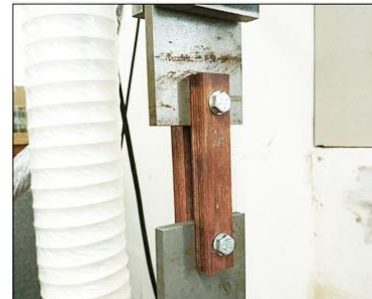
*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Vorgespannte Schrauben 2"					
Thema	Einfluss der Zeit auf vorgespannte KP-Anschlüsse mit Schrauben M8				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
08 - 12' 2018	Dissertation Röver	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 8mm, Festigkeit 8.8	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Vorspannung	a ₃ / a ₄	t
90% Lastabf.	0,5 mm/min	DR	27,3 Nm	2,5d / 1,5d	15 mm



System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$

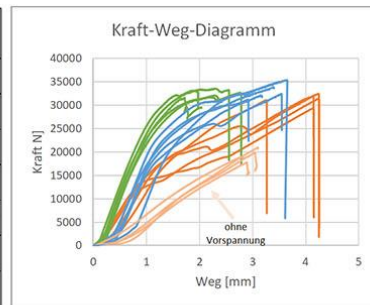
** in
Anlehnung



Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben-schlankheit	Vergleichsfestig-keit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	V [mm/min]	Bezeichnung	Vorspannung
1	1a/b	0,53	26,0	18,75	24,00	15,00	324	18,6	16,4	0,50	ohne Vorsp. 1	keine
2	2a/b	0,53	24,3	17,52	24,00	15,00	246			0,50	ohne Vorsp. 2	keine
3	3a/b	0,53	26,5	19,06	24,00	15,00	340			0,50	ohne Vorsp. 3	keine
4	4a/b	0,53	24,8	17,83	24,00	15,00	353			0,50	ohne Vorsp. 4	keine
5	5a/b	0,53	27,5	19,82	24,00	15,00	369			0,50	ohne Vorsp. 5	keine
6	recycling	0,53	29,2	20,99	24,00	15,00	373			0,50	ohne Vorsp. 5	keine
7	1a/b	0,53	44,1	31,77	24,00	15,00	389	27,6	18,9	0,50	mit Vorsp. 1	ja, t = 0d
8	2a/b	0,53	37,0	26,66	24,00	15,00	303			0,50	mit Vorsp. 2	ja, t = 0d
9	3a/b	0,53	43,8	31,53	24,00	15,00	358			0,50	mit Vorsp. 3	ja, t = 0d
10	4a/b	0,53	35,5	25,56	24,00	15,00	238			0,50	mit Vorsp. 4	ja, t = 0d
11	5a/b	0,53	30,9	22,26	24,00	15,00	202			0,50	mit Vorsp. 5	ja, t = 0d
12	Mat.fehler a	0,53	23,5	16,22	24,00	15,00	318			0,50	mit Vorsp. 6	ja, t = 0d
13	1a/b	0,53	39,8	28,69	24,00	15,00	359	28,0	21,1	0,50	mit Vorsp. 1	ja, t = 35d
14	2a/b	0,53	32,5	23,42	24,00	15,00	321			0,50	mit Vorsp. 2	ja, t = 35d
15	3a/b	0,53	44,1	31,78	24,00	15,00	420			0,50	mit Vorsp. 3	ja, t = 35d
16	4a/b	0,53	40,6	29,24	24,00	15,00	340			0,50	mit Vorsp. 4	ja, t = 35d
17	5a/b	0,53	37,6	27,10	24,00	15,00	319			0,50	mit Vorsp. 5	ja, t = 35d
18	6a/b	0,53	40,2	28,95	24,00	15,00	369	28,3	23,7	0,50	mit Vors. 6	ja, t = 105d
19	7a/b	0,53	36,1	26,03	24,00	15,00	299			0,50	mit Vors. 7	ja, t = 105d
20	8a/b	0,53	41,8	30,10	24,00	15,00	424			0,50	mit Vors. 8	ja, t = 105d
21	9a/b	0,53	41,8	30,11	24,00	15,00	440			0,50	mit Vors. 9	ja, t = 105d
22	10a/b	0,53	36,58	26,34	24,00	15,00	346			0,50	mit Vors. 10	ja, t = 105d

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Vorgespannte Schrauben 3"					
Thema	Einfluss der Zeit auf vorgespannte KP-Anschlüsse mit Schrauben M8				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
10'18- 02'19	Dissertation Röver	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 8mm, Festigkeit 8.8 Rändel	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Vorspannung	a ₃ / a ₄	t
90% Lastabf.	0,5 - 0,4 mm/min	DR	27,3 Nm	2,5d / 1,5d	15 mm



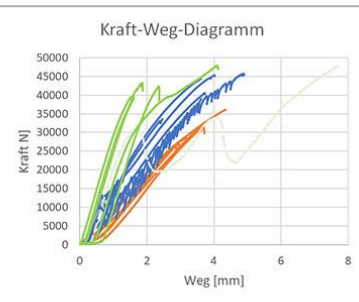
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



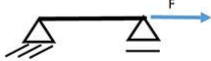
Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben-schlankheit	Vergleichsfestigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	V [mm/min]	Bezeichnung	Sonstiges
1	1Ar/Br	0,53	43,9	31,62	24,00	15,00	245	32,6	30,8	0,50	1Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
2	2Ar/Br	0,53	46,0	33,12	24,00	15,00	237			0,50	2Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
3	3Ar/Br	0,53	46,6	33,57	24,00	15,00	308			0,50	3Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
4	4Ar/Br	0,53	45,4	32,72	24,00	15,00	334			0,40	4Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
5	5Ar/Br	0,53	44,6	32,11	24,00	15,00	291			0,40	5Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
6	1Ar/Br 17.10	0,53	49,2	35,41	24,00	15,00	438	33,4	29,6	0,50	1Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
7	2Ar/Br 17.10	0,53	43,4	31,24	24,00	15,00	351			0,50	2Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
8	3Ar/Br 17.10	0,53	45,1	32,46	24,00	15,00	426			0,50	3Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
9	4Ar/Br 17.10	0,53	48,6	35,02	24,00	15,00	423			0,50	4Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
10	5Ar/Br 17.10	0,53	47,0	33,87	24,00	15,00	408			0,50	5Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
11	6Ar/Br 17.10	0,53	44,6	32,13	24,00	15,00	382			0,50	6Ar/Br 17.10	8.8 / Rändel t=35d
12	1Ar/Br 06.02	0,53	43,2	31,11	24,00	15,00	392	31,3	28,5	0,50	1Ar/Br 06.02	8.8 / Rändel t=105d
13	2Ar/Br 06.02	0,53	40,9	29,43	24,00	15,00	433			0,50	2Ar/Br 06.02	8.8 / Rändel t=105d
14	3Ar/Br 06.02	0,53	44,6	32,08	24,00	15,00	433			0,50	3Ar/Br 06.02	8.8 / Rändel t=105d
15	4Ar/Br 06.02	0,53	43,6	31,41	24,00	15,00	426			0,50	4Ar/Br 06.02	8.8 / Rändel t=105d
16	5Ar/Br 06.02	0,53	45,1	32,48	24,00	15,00	425			0,50	5Ar/Br 06.02	8.8 / Rändel t=105d
17	1a/b	0,53	26,0	18,75	24,00	15,00	324	18,6	16,4	0,50	ohne Vorsp. 1	keine
18	2a/b	0,53	24,3	17,52	24,00	15,00	246			0,50	ohne Vorsp. 2	keine
19	3a/b	0,53	26,5	19,06	24,00	15,00	340			0,50	ohne Vorsp. 3	keine
20	4a/b	0,53	24,8	17,83	24,00	15,00	353			0,50	ohne Vorsp. 4	keine
21	5a/b	0,53	27,5	19,82	24,00	15,00	369			0,50	ohne Vorsp. 5	keine
22	recycling	0,53	29,15	20,99	24,00	15,00	373			0,50	ohne Vorsp. 5	keine

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Vorgespannte Schrauben 4"					
Thema	Einfluss der Vorspannung bei KP-Köpfen				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
11'18- 12'18	Dissertation Röver	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 10mm, Festigkeit 8.8 Ränd	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Vorspannung	a ₃ / a ₄	t
90% Lastabf.	0,5 - 0,4 mm/min	DR	54 Nm	2,5d / 1,5d	15 mm



** in
Anlehnung

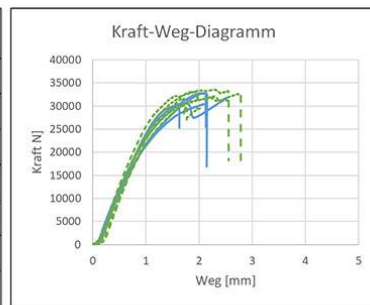
System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben- schlankheit	Vergleichsfestig- keit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	V [mm/min]	Bezeichnung	Sonstiges
1	M10 1a/b	0,67	40,14	36,13	30,00	15,00	347,68	30,3	23,1	0,50	M10 1a/b	o.V.
2	M10 2a/b	0,67	30,09	27,08	30,00	15,00	246,52			0,40	M10 2a/b	o.V.
3	M10 3a/b	0,67	35,02	31,52	30,00	15,00	292,60			0,40	M10 3a/b	o.V.
4	M10 4a/b	0,67	29,92	26,93	30,00	15,00	236,78			0,40	M10 4a/b	o.V.
5	M10 5a/b	0,67	31,72	28,55	30,00	15,00	262,08			0,40	M10 5a/b	o.V.
6	M10 6a/b	0,67	34,82	31,34	30,00	15,00	296,52			0,50	M10 6a/b	o.V.
7	M10 8.8 1a/b	0,67	50,86	45,78	30,00	15,00	439,68	41,5	31,2	0,75	M10 8.8 1a/b	8.8 t=0d
8	M10 8.8 2a/b	0,67	43,32	38,99	30,00	15,00	289,72			0,75	M10 8.8 2a/b	8.8 t=0d
9	M10 8.8 3a/b	0,67	45,13	40,62	30,00	15,00	298,74			0,75	M10 8.8 3a/b	8.8 t=0d
10	M10 8.8 4a/b	0,67	37,34	33,60	30,00	15,00	197,42			0,75	M10 8.8 4a/b	8.8 t=0d
11	M10 8.8 5a/b	0,67	49,31	44,38	30,00	15,00	288,54			0,75	M10 8.8 5a/b	8.8 t=0d
12	M10 8.8 6a/b	0,67	50,38	45,34	30,00	15,00	321,58			0,75	M10 8.8 6a/b	8.8 t=0d
13	1Ar/Br	0,67	48,01	43,21	30,00	15,00	225,22	43,8	36,7	0,50	1Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
14	2Ar/Br	0,67	46,18	41,56	30,00	15,00	273,90			0,40	2Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
15	3Ar/Br	0,67	44,36	39,92	30,00	15,00	241,46			0,40	3Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
16	4Ar/Br	0,67	53,07	47,76	30,00	15,00	439,68			0,40	4Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
17	5Ar/Br	0,67	53,22	47,90	30,00	15,00	439,68			0,40	5Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
18	6Ar/Br	0,67	47,04	42,33	30,00	15,00	284,78			0,50	6Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d

*** arithmetisches Mittel

Prüfprotokoll zu Reihe "Vorgespannte Schrauben 5"					
Thema	Randabstand a3 bei gleitfesten Verbindungen auf Rändel				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
10'18- 01'19	Dissertation Röver	Zugversuch	KP BE 335-1 67%/33%Q	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	T-Lab	20°C / 65%	d = 8mm, Festigkeit 8.8 Rändel	DIN EN 408**	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	Vorspannung	a ₄	t
90% Lastabf.	0,5 - 0,4 mm/min	DR	27,4 Nm	1,5d	15 mm



Geometrie:

** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Prüfkörper	Schrauben- schlankheit	Festigkeit f [N/mm²]	Tragfähigkeit [kN]	b [mm]	t [mm]	Zeit [s]	Tragfähigkeit mittel[kN]***	Tragfähigkeit char. [kN]	a3	Bezeichnung	Sonstiges
1	1Ar/Br	0,53	43,9	31,62	24,00	15,00	245	32,6	30,8	2,5	1Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
2	2Ar/Br	0,53	46,0	33,12	24,00	15,00	237			2,5	2Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
3	3Ar/Br	0,53	46,6	33,57	24,00	15,00	308			2,5	3Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
4	4Ar/Br	0,53	45,4	32,72	24,00	15,00	334			2,5	4Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
5	5Ar/Br	0,53	44,6	32,11	24,00	15,00	291			2,5	5Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
6	Fehlstelle 1	0,53	0,0	0,00	24,00	15,00	0			2,5	Fehlstelle 1	8.8 / Rändel t=0d
7	Fehlstelle 1	0,53	0,0	0,00	24,00	15,00	0			2,5	Fehlstelle 1	8.8 / Rändel t=0d
8	1Ar/Br	0,53	42,3	30,44	24,00	15,00	255	31,6	28,6	1,5d	1Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
9	2Ar/Br	0,53	45,6	32,83	24,00	15,00	255			1,5d	2Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
10	3Ar/Br	0,53	41,9	30,18	24,00	15,00	196			1,5d	3Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
11	4Ar/Br	0,53	45,6	32,81	24,00	15,00	259			1,5d	4Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
12	5Ar/Br	0,53	44,2	31,82	24,00	15,00	303			1,5d	5Ar/Br	8.8 / Rändel t=0d
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

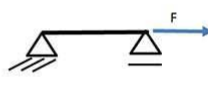
*** arithmetisches Mittel

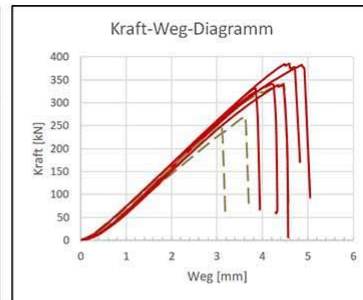
Prüfprotokoll zu Reihe Bauteilversuche					
Thema	Keilzinkenfestigkeit Fichte + KP, I15, PFR*				
Datum	Projekt	Prüfung	Material	Prüfer	
08.05.2017	Forschungsprojekt Deho	Zugversuch	KP-verstärkter Fichtenstab	DR	
Steuerung	Prüfmaschine	Konditionierung	Besonderheiten	Norm	
Weg	Bau 60	20°C / 55%	Zangenanschluss	DIN EN 408***	
Stop	Prüfgeschwindigkeit	Hersteller	$f_{t,vg, mittel}^{**}$ [N/mm²]	$f_{t,vg, k}^{**}$ [N/mm²]	KP
25% Lastabf..	2,1 mm/min	Deutsche Holzveredelung	24,6	21,1	BE 335-1 67%L/33%Q

*BAKELITE PF 0283 HL + BAKELITE PFH 018

** PK 1,3,4,5,6,8

*** in
Anlehnung

System	
Formel	$\sigma_t = \frac{F_{max}}{A}$



Parameter												
n	Stab 1	Stab 2	Festigkeit f [N/mm²]	Bruchlast [kN]	Breite b [mm]	Tiefe t [mm]	Zeit [s]	Stab 1	Stab2	Bruch	an Stab	sonstiges
1	1A	1B	23,8	343	120,00	2 x 60	258	C24	C30	Holzbruch	1	
2	2A	2B	18,9	271	120,00	2 x 60	209	C24	C24	Holzbruch	1	
3	3A	3B	23,7	341	120,00	2 x 60	251	C30	C30	KP-Bruch	1	
4	4A	4B	23,5	339	120,00	2 x 60	258	C30	C30	KP-Bruch	2	
5	5A	5B	23,1	333	120,00	2 x 60	222	C30	C30	KP-Bruch	1	
6	6A	6B	26,6	383	120,00	2 x 60	284	C24	C24	KP-Bruch	2	
7	2B	3B	17,7	255	120,00	2 x 60	179	C24	C30	Holzbruch	1	
8	5B	1B	26,8	385	120,00	2 x 60	272	C30	C30	KP-Bruch	2	
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
19												
20												

Lebenslauf

geboren 1983 in Saarbrücken

Ausbildung

2015-2020	Promotion Technische Universität Kaiserslautern
2016-2017	Geprüfter Sachverständiger für Holzschutz (EIPOS) Europäisches Institut für postgraduale Bildung, Dresden
2004-2011	Diplom-Ingenieur Technische Universität Kaiserslautern, Studiengang Architektur
2009-2010	Gaststudium Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Hochschultätigkeit

2011-dato	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Technische Universität Kaiserslautern Fachgebiet Tragwerk und Material, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Graf
2006-2011	Wissenschaftliche Hilfskraft Technische Universität Kaiserslautern Fachgebiet Tragwerksentwurf und Konstruktionen, Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft

Förderung

Stipendium	Studienstiftung des deutschen Volkes und Sutor-Stiftung
------------	---